

3.11.9

**DAS RISSVERHALTEN
DER MENSCHLICHEN LANGEN DAUMEN-
STRECKSEHNE IM EXPERIMENT**

Johannes Proksch

1980



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Chirurgischen Klinik der Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. G. Heberer

DAS RISSVERHALTEN DER MENSCHLICHEN LANGEN DAUMEN-
STRECKSEHNE IM EXPERIMENT

Inaugural-Dissertation

Zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Johannes Proksch
aus
München

1980

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof.Dr.K.Wilhelm

Mitberichterstatter: Prof.Dr.G.Heberer
Prof.Dr.H.Frick

Dekan: Prof.Dr.W.Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.1980



Meinen Eltern

1. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
2. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
3. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
4. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
5. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
6. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
7. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
8. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
9. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.
10. Ich danke euch sehr herzlich für alles, was ihr für mich getan habt.

INHALTSVERZEICHNIS

I.	<u>EINLEITUNG</u>	1
1.	Geschichtlicher Überblick	1
2.	Problemstellung der eigenen Untersuchungen	8
II.	<u>DIE SEHNE DES M. EXTENSOR POLLICIS LONGUS</u>	9
1.	Anatomie	9
2.	Besonderheiten	10
III.	<u>METHODIK UND AUSWERTUNG DER RISSVERSUCHE</u>	12
1.	Entnahme und Aufbewahrung der Sehnen	12
2.	Die Reißapparatur	12
2.1.	Der Fallbär	12
2.2.	Die Aufhängevorrichtung	14
3.	Flächenbestimmung des Sehnenquerschnitts	18
3.1.	Bisher angewendete Methoden	18
3.2.	Das Negativabdruckverfahren mit Silikonkautschuk	19
3.3.	Die Querschnittsmessung mit dem Präzisions- stereokomparator und der dabei auftretende Meßfehler	24
3.4.	Meßfehler bedingt durch den Silikonkautschuk	34
IV.	<u>ERGEBNISSE</u>	42
1.	Die maximale Belastbarkeit der Sehne des M. extensor pollicis longus	42
2.	Lokalisation des Reißbereiches	43
3.	Der Reißbereich	45
4.	Querschnitte	46
4.1.	Die Querschnittsänderung im Verlaufe der Sehne	47

4.2.	Der mittlere Querschnitt der Sehnen	53
4.3.	Der geringste Querschnitt der Sehnen und dessen Lokalisation	53
4.4.	Vergleich der Sehnenquerschnitts- flächen mit verschiedenen Parametern	57
5.	Vergleich der maximalen Belastbarkeit der Sehne mit verschiedenen Parametern	63

V.	<u>DISKUSSION</u>	72
----	-------------------	----

VI.	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	78
-----	------------------------	----

VII.	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	80
------	-----------------------------	----

I. EINLEITUNG

1. Geschichtlicher Überblick

Der Riß der langen Daumenstrecksehne liegt nach Rupturen der Achillessehne, Quadriceps- und Bicepssehnen in Bezug auf die Häufigkeit von Sehnenrissen an 4. Stelle (32). Manchmal genügen kleinste Bewegungen oder Kraftaufwendungen um den Riß der Daumenstrecksehne herbeizuführen.

Als Ursache dieser Rupturen vermutete erstmals DUPLAY (19) (1876) eine chronische Schädigung der Sehne, die er vor allem bei Trommlern beobachtete. Seitdem nahmen die Überlegungen und Untersuchungen zur Aufklärung der Spontanrupturen kein Ende. ZUR VERTH (79) veröffentlichte im Jahre 1900 seine Beobachtungen, daß Daumensehnenrupturen auch bei Zimmerleuten, Polierern und Kellnern auf Grund dauernder abnormer Beanspruchung vorkommen.

1902 fand TRIEPEL (68) bei seinen Sehnenrißversuchen eine geringe Sicherheit der Sehne bezüglich der auf sie einwirkenden Muskelkraft. Neuere Untersuchungen ließen aber die gefundene geringe Belastbarkeit der Sehnen von 5 kp/cm² als fraglich erscheinen (vgl. Tab. 1). Nach 1920 bemühten sich mehrere Autoren um die Zusammenhänge zwischen chronischer Beanspruchung und Einlagerungen in den Sehnen.

ALBERTINI (1) berichtete 1921 über Kalkablagerungen in Sehnenansätzen. MOISSEJEFF (49) stellte mit zunehmenden Alter einen "verlangsamten Säfteumlauf" fest und führte darauf den Niederschlag feinsten suspendierter Lipoidteilchen in der Sehnenstruktur zurück.

KAWAMURA (35) entdeckte 1927 Unterschiede in der Lipoidose zwischen Sehnen der rechten und linken Extremität. KOLEN (40) stellte in seinen Untersuchungen fest, daß die Lipoidinfiltration erst in den zentralen Abschnitten der sekundären Sehnenbündel und erst später in den fibrösen Bündeln der Peripherie erfolgt.

Tabelle 1: Angaben über verschiedene Zugfestigkeiten von Sehnen

Gewebe	Zugfestigkeit (kp/qmm)	Literatur
Verschiedene Sehnen	2,6	VALENTIN, OTZ und HENZI (1844)
Plantarissehne: Mensch	6,9	VALENTIN (1847)
Palmarissehne: Mensch	1,9	
Plantarissehne: Mensch	6,1(4,1-10,4)	WERTHEIM (1847)
Verschiedene Sehnen	6,9	RAUBER (1876)
Plantarissehne: Mensch	4,5	TRIEPEL (1902)
Verschiedene Sehnen: Mensch	3,25-5,24	WÖHLISCH (1926)
Bicepssehne: Mensch	6,4	NICOLA (1934)
Kaninchen, Ziege, Hund, Schaf und Mensch	4,9-14,8	GRATZ und BLACKBERG (1935) GRATZ (1937)
Verschiedene Sehnen: Mensch	2,8-21,0*	CRONKITE (1936)
Verschiedene Sehnen: Hund	9,4(3,2-18,2)	MASON und ALLEN (1941)
Verschiedene Sehnen: Mensch	6,5-25,5*	
Achillessehne: Mensch	4,7	STUCKE (1950)
Extensor digitorum longus Sehne: Mensch	9,0(4,3-11,5)	ROLLHÄUSER (1950)
Achillessehne: Hund	0,6	LA BAN (1962)

*Sehnen von konservierten Leichen

Modifizierte Tabelle nach D.H. ELLIOTT: Structure and function
of mammalian tendon. Biol. Rev. 40 (1965) 405

Gewebe	Zugfestigkeit (kp/qmm)	Literatur
Plantarissehne: Mensch	10,0* (7,5-15,0) *	WALKER, HARRIS und BENEDICT (1964)
Verschiedene Sehnen: Mensch	5,2-14,7	BENEDICT, WALKER und HARRIS (1968)
Konservierte Kaninchensehnen	2,2	BRÜCHLE und MOLL (1968)
Verschiedene Sehnen: Mensch	7,38*	BLANTON und BIGGS (1970)
Achillessehne: Mensch	10,1	WILHELM (1972)
Sehne des Großen Zehenstreckers: Mensch	9,9	ARNOLD (1974)

*Sehnen von konservierten Leichen

Modifizierte Tabelle nach D.H. ELLIOTT: Structure and function
of mammalian tendon. Biol. Rev. 40 (1965) 405

Die Leichenversuche von KLEINSCHMIDT (36) im Jahre 1928 erklärten die isolierte Schädigung der Sehne des M. extensor pollicis longus nach Radiusfraktur. Bei künstlich erzeugten Speichenbrüchen konnte er bis durch die Sehnenscheide hindurchreichende Risse beobachten. Die übrigen Strecksehnenfächer blieben verschont.

Eine übermäßig starke Zugbeanspruchung der Sehne des M. extensor pollicis longus durch reflektorische Abspreizung bei einem Sturz auf die Hand machte COENEN (15) 1930 dafür verantwortlich, daß es anschließend in der Sehne zu degenerativen Veränderungen kam. Neben den Radiusfrakturen erkannte DÜMS (18) weitere Faktoren, welche Spontanrupturen der Sehne des M. extensor pollicis longus begünstigen: Handgelenksdistorsionen, Handgelenksquetschungen, Lunatumfrakturen, perilunäre Luxationen.

Nach KÖNIG und MAGNUS (37) traten Spontanrupturen von Sehnen nach Veränderungen der Gleitbahn auf, wie sie vorwiegend bei chronischer Beanspruchung der Sehnen vorkamen. Posttraumatische Sehnenrupturen führten KÖNIG und MAGNUS auf trophische Störungen nach Frakturen zurück. Außerdem stellten sie eine sehr geringe Stoffwechselaktivität und Gefäßarmut bei Sehnen fest. Nach mehr als 30 Lebensjahren sollen Sehnen sogar gefäßfrei sein. Die Ernährung erfolgt dann nur über das Peritenonium externum und in den Sehnenscheiden über das Mesotenon. Hier ist das Sehnen- gewebe gegenüber Störeinflüssen besonders anfällig. FRANCESCO (24) beschrieb 1934 fortschreitende Rückbildungsprozesse der Sehnengefäße nach dem 30. Lebensjahr bis zur vollständigen Obliteration. Als Folge davon stellte er Ab- und Umbauvorgänge in Form von Schwielenbildungen und Verkalkungen im Sehnen- gewebe fest.

In voneinander unabhängigen Untersuchungen beobachteten CHALETZKAJA (14), LAZZARONI (46) und AUSTONI (3) eine zunehmende Lipoideinlagerung in Sehnen mit dem Alter, wobei sie allerdings bis zum Beginn des 4. Lebensjahrzehnts keine Einlagerungen feststellen konnten. Zahlreiche Allgemeinerkrankungen wie

Diabetes, Tbc, Gicht, rheumatische Affektionen, Lues, Syringomyelie, Arteriosklerose und Infektionen begünstigen degenerative Veränderungen und damit Spontanrupturen von Sehnen (3,4, 13,24,33,34,45,48,55,58,66,76).

Pathogenetisch kam sowohl eine Schädigung der Gefäße im Peritenonium in Betracht, als auch chronisch entzündliche Formveränderungen und Abnutzungserscheinungen der Gelenke. PLATZGUMMER (56) nennt als Ursache von Spontanrupturen auch konstitutionelle Abweichungen, wie angeborene Bindegewebsschwächen.

Sehnenrisse können nach DEBRUNNER (17) ebenfalls durch unkoordinierte Bewegungen und reflektorische Kontraktionen entstehen, was aber nach Untersuchungen der schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (12) bei 122 Rupturen nur ca. 2 % ausmacht. Er widerspricht damit zum Teil den Untersuchungen von JENNY (33) der Sehnenrisse nach elektrischen Unfällen - bei denen es zu stärksten Muskelkontraktionen kommt - nur feststellte, wenn die Sehne geschädigt war.

Einig sind sich die Autoren darin, daß es nach längerdauernder Überbeanspruchung der Sehne zu degenerativen Veränderungen kommt. Dabei erleidet die Sehne einen Elastizitätsverlust und wird dadurch rißbereiter (76).

Sehnenrisse des M. extensor pollicis longus im Gefolge von Radiusfraktur und Handgelenksdislokation sind lange bekannt. TREVOR (67) sah sie ausschließlich bei Frauen, die meist über 50 Jahre alt waren. Neben den schon länger bekannten trophischen Störungen nach Radiusfrakturen entdeckte ROLLHÄUSER (60), daß durch die Auflösung von Micellen bei Entlastung der Sehnen (z.B. im Gipsverband) die Zugfestigkeit stark herabgesetzt wird.

GAY (26) führt die posttraumatischen Rupturen des M. extensor pollicis longus auf nur zwei Ursachen zurück:

1. Primäre Schädigung durch das Unfallereignis
2. Durchblutungsstörungen des Sehnengewebes

Auf 270 Radiusfrakturen fand BÖHLER (7) nur eine Spontanruptur, nach anderen Handgelenkstraumen noch seltener. Im Durchschnitt vergingen vom Unfallereignis bis zum Sehnenriß 2-8 Wochen, in einem Extremfall sogar 40 Jahre.

Bereits 1914 vermutete WEIGELDT (70) eine primär vaskuläre Genese der Spontanrupturen. Neuere Untersuchungen von FREILINGER und ZACHERL (25) im Jahre 1970 bestätigten diese Annahme. Sie fanden bei sechs Patienten mit frischer Radiusfraktur in allen Fällen im dritten Sehnenfach ein Hämatom. Mikroskopisch konnte ein Abriß des Mesotenons eindeutig erkannt werden. Ein Frakturspalt am Grunde des Sehnenkanals war in keinem der Fälle nachzuweisen.

Zusammenfassend werden also die Ursachen der Rupturen der langen Daumenstrecksehne folgenden Gruppen zugeordnet:

1. Direkte traumatische Durchtrennung der am Handrücken sehr exponiert verlaufenden Sehne. Dieser Vorgang bedarf keiner näheren Erläuterung und wird auch in der vorliegenden Arbeit nicht näher behandelt.

2. Subkutane Sehnenruptur nach einem handgelenksnahen Trauma. Nur in einem äußerst geringen Teil der Fälle ist ein Sehnenriß direkt nach dem Trauma festzustellen. In der überwiegenden Mehrzahl vergingen zwischen dem Trauma und der Sehnenruptur wenige Wochen, in Einzelfällen sogar mehrere Jahre. Vorherrschende Verletzungsart ist die Radiusfraktur in loco typico. Seltener sind Handgelenksdistorsionen oder Navicularfrakturen die Ursache der posttraumatischen Sehnenruptur. Nach neueren Untersuchungen ist dabei die Verletzung des Mesotenons und damit die Verschlechterung der Durchblutungsverhältnisse von entscheidender Bedeutung. Es kommt zu einer Abnahme der Zugfestigkeit und damit zur erhöhten Bereitschaft einer Spontanruptur.

3. Subkutane Sehnenruptur bei chronischen Mikrotraumen

Bestimmte Tätigkeiten, die mit einer chronischen Überbean-

spruchung des Daumens einhergehen, können auch ohne ein handgelenknahes Trauma zu einer Spontanruptur führen.

4. Subkutane Sehnenruptur bei einer Grunderkrankung mit degenerativer Sehnenbeteiligung. Dies trifft hauptsächlich auf Krankheiten aus dem rheumatischen Formenkreis, Arteriosklerose, Diabetes und Syphillis zu, also auf Krankheiten, bei denen auch das Gefäßsystem eine Schädigung erfährt.

2. Problemstellung der eigenen Untersuchungen

Außer bei direkten traumatischen Sehnenrupturen ist die Lokalisation des Sehnenrisses meist in der Nähe des distalen Randes des Retinaculum extensorum festgestellt worden. Diese Tatsache hat zu der Überlegung Anlaß gegeben, ob an dieser Prädilektionsstelle die Ruptur ausschließlich wegen der außergewöhnlichen anatomischen Situation erfolgt. Eine Aussage darüber kann nur durch Experimente mit unbeschädigten Sehnen von Individuen verschiedenen Alters und Geschlechtes gewonnen werden.

In dieser Dissertation wird nun untersucht, ob bei den langen Daumenstrecksehnen im Reißversuch ein Schwachpunkt im Sehnenverlauf vorliegt, und wie weit eine mögliche Prädilektionsstelle des experimentellen Risses mit dem Ort der klinischen Ruptur übereinstimmt. Weiterhin werden verschiedene Parameter des jeweiligen Individuums mit den bei den Reißversuchen ermittelten Meßgrößen verglichen und statistisch verarbeitet.

II. DIE SEHNE DES M. EXTENSOR POLLICIS LONGUS

1. Anatomie

Der Muskel extensor pollicis longus entspringt an der Ulna und der angrenzenden Membrana interossea antebrachii und inseriert mit seiner Sehne an der Basis der Nagelphalanx des Daumens.

Der Muskel streckt zusammen mit dem M. extensor pollicis brevis den Daumen in Mittel- und Endglied. Außerdem wirkt er im Handgelenk als Strecker, Abduktor und schwacher Supinator. Der Muskel-Sehnenübergang liegt ca. 3 cm proximal des Eintritts in das dritte Sehnenfach, in welchem die Sehne in einer engen Knochenrinne durch eine Sehnenscheide geschützt wird. Nach dem Austritt aus dem Sehnenfach erfährt die Sehne eine relativ starke Ablenkung nach radial mit der Crista radii als Hypomochlion. Bei einer Flexion des Handgelenks beträgt die Abknickung der Sehne bis zu 90°. Bis zur Insertionsstelle am Daumen wird die Sehne von lockerem Bindegewebe umgeben, sodaß sie den vielfältigen Bewegungsmöglichkeiten des Daumens in jeder Richtung folgen kann. Viele Sehnenfasern strahlen bereits in die Grundphalanx des Daumens aus.

Die Sehnenlänge, gemessen von der Insertion an der Endphalanx bis zum Muskelsehnenübergang schwankte bei 60 vermessenen Sehnen meist zwischen 13,5 cm und 15 cm, in Extremwerten zwischen 10,8 cm und 15,5 cm.

Die großen Längenunterschiede waren hauptsächlich durch zwei Faktoren bedingt:

1. Konstitutionelle Abweichung von Körpergröße, Armlänge und Größenunterschied der Hand
2. Wechselnd weites Übergreifen des Muskels auf die Sehne

Um bei der Auswertung die Reißstellen von unterschiedlich langen Sehnen verschiedener Individuen besser vergleichen zu können, wurde die Strecke distaler Knochenansatz der Sehne bis distaler Rand des Retinaculum extensorum gleich 100 gesetzt. Dann war

0	: der Knochenansatz
40 - 45	: der Bereich über dem Daumengrundgelenk
100	: distaler Rand des Retinaculum extensorum
115 - 125	: Muskel-Sehnenübergang

Die Blutversorgung der langen Duamenstrecksehne erfolgt in der Sehnenscheide über das Mesotenon und die Vinculae (64).

2. Besonderheiten

33 % der untersuchten Sehnen waren gespalten. In einigen Fällen wies nur der distale Anteil eine Spaltung auf, in der Mehrzahl der Fälle erstreckte sich die Spaltung auf die gesamte Länge der Sehne. Beide Sehnenanteile besaßen eine gemeinsame Sehnenscheide.

Eine Besonderheit war die Sehne eines 75-jährigen Mannes, dessen M. extensor pollicis longus aus 2 Anteilen bestand. Im Verlauf der Sehne des einen Muskelanteils war distal des Durchtritts durch das Sehnenfach zusätzlich eine Spaltung dieser Sehne zu beobachten (s. Abb. 1a, b).

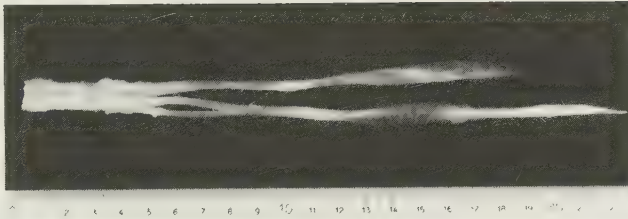


Abb. 1a: Zweigeteilter M. extensor pollicis longus

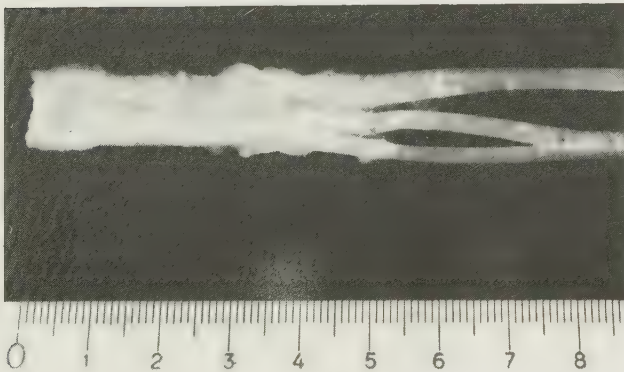


Abb. 1b: Ansatzzone des zweigeteilten M. extensor pollicis longus

Sowohl der M. extensor pollicis brevis der gleichen Seite als auch die beiden Daumenstrecker des anderen Armes wiesen keine Besonderheiten auf.

III. METHODIK

1. Entnahme und Aufbewahrung der Sehnen

Für die Versuche wurden nur unbeschädigte Sehnen verwendet, die innerhalb von 24-36 Stunden post mortem von Leichen aus dem Gerichtsmedizinischen Institut der Universität München entnommen wurden.

Das Herauspräparieren der Sehne begann mit einem Hautlängsschnitt vom Daumnagel bis zum Grundgelenk auf der Daumenstreckseite. Als zweites erfolgte die Ablösung der Sehne vom Daumenendglied und der Grundphalanx. Anschließend wurde die Sehne nach einem Hautschnitt etwa 2 cm proximal der Sehnenfächer aufgesucht, durch das Sehnenfach gezogen und etwa 4 cm innerhalb des Übergangs zum Muskel abgetrennt. Den Abschluß bildete die Abtastung des Radius auf eine etwaige in vivo eingetretene Radiusfraktur. In einem Fall war durch das zum Tode führende Unfallgeschehen ein Radius gebrochen. Die Sehne dieses Armes wurde nicht für die Versuche verwendet.

Von jeder Sehne wurde ein Protokoll angefertigt, in dem Alter, Geschlecht, Gewicht, Größe, Handgelenk-, Mittelhandumfang, Sehnenlänge, Todesursache und Todeszeit des Toten festgehalten wurden. In demselben Protokoll waren Aufzeichnungsmöglichkeiten für die Auswertung der Reißversuche vorgesehen. Bis zur Durchführung der Reißversuche wurde die Sehne in physiologischer NaCl-Lösung kühl aufbewahrt.

2. Die Reißapparatur

2.1. Fallbär

Die Reißversuche wurden im Materialprüfamt der TU-München durchgeführt.

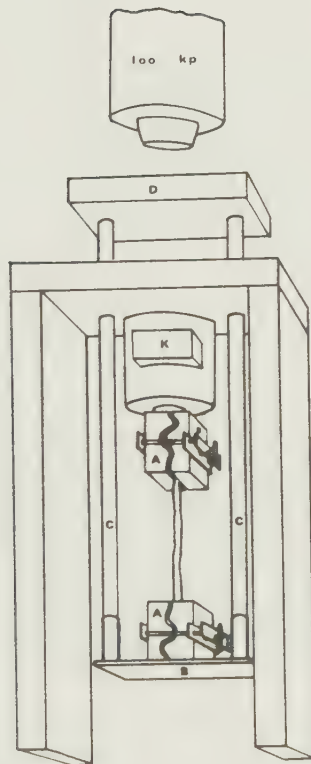


Abb. 2: Die Versuchsanordnung

Die Sehnen wurden in eigens konstruierte Haltevorrichtungen (A in Abb. 2) eingespannt. Das eine Sehnenende war über die eine Haltevorrichtung mit einer Kraftmeßdose (K) gekoppelt, das andere Sehnenende wurde über die andere Haltevorrichtung, mit einer rechteckigen Metallplatte (B) verbunden. Diese Metallplatte war durch zwei Metallstangen (C), welche durch die Aufhängung der Kraftmeßdose geführt wurden, mit einer zweiten Metallplatte (D), der Aufschlagplatte, verbunden. Die Stangen waren etwa 10 cm länger als die Länge der Sehne und Kraftmeßdose zusammen. Dadurch befand sich die obere Metallplatte bei eingespannter Sehne etwa 10 cm oberhalb der Kraftmeßdose. Die Vorspannung der Sehne ergab sich aus dem Eigengewicht der unteren Haltevorrichtung der beiden Stangen und der Aufschlagplatte, die man zusätzlich noch belasten konnte. Bei den Versuchen wurde eine Vorspannung der Sehnen von 5 kp gewählt. Bei Auslösung des Fallgewichtes von 100 kp übertrug die obere Metallplatte die Kraft über die zwei Stangen auf die untere Metallplatte mit der daran angebrachten Haltevorrichtung für die Sehne und setzte die Sehne einer dynamischen Belastung aus. Die beim Reißversuch über die Sehne an der Kraftmeßdose angreifende Kraft wurde über einen Meßverstärker und einen Lichtstrahloszillographen auf lichtempfindliches Papier bei einem Vorschub von 200 mm/sec aufgezeichnet (Abb. 10).

2.2. Die Aufhängevorrichtung

Die zwei Verbindungsstellen der Sehne mit dem Fallbären sind für die Messung der zum Sehnenriß notwendigen Kraft von entscheidender Wichtigkeit. Ist diese Verbindung zu locker, so rutscht die Sehne vor dem Reiß heraus und kann für weitere Versuche nicht mehr verwendet werden. Die dabei gerissenen Faserbündel würden eine erneute Messung verfälschen.

Die bisher in der Literatur bekanntgewordenen Aufhängevorrichtungen basierten im Grundprinzip meist auf der Einspannung der Sehne zwischen zwei mit hohem Druck zusammengepreßten Platten. Nach diesem System wurden auch die ersten Vorversuche dieser Arbeit durchgeführt:

1. Zwischen zwei Platten mit glatter Oberfläche rutschte die Sehne auch bei sehr starkem Druck auf die beiden Klemmbacken heraus. Daran änderte sich auch nichts als zur Erhöhung der Reibungskraft zwischen die Sehne und die Platten verschiedenartige Materialien eingelegt wurden.

2. Eine bessere Haltbarkeit konnte auch bei der Verwendung gleichmäßig gewellter Plattenoberflächen (Abb. 3) nicht erreicht werden. Bei zu flach gewählten Krümmungen war ein Herausrutschen der Sehne nicht zu vermeiden. Bei stärker gewählten Krümmungen riß die Sehne an der letzten Umlenkung.

3. Bei weiteren Versuchen mit einer völlig umgebauten Vorrichtung wurde die Sehne durch ein dem Sehnenquerschnitt entsprechendes Loch in der Aufhängung geführt und dahinter verknotet. Auch bei noch so sorgfältiger Lagerung des Knotens in der Aufhängung riß die Sehne beim Belastungsversuch immer am Knoten. Auch Versuche mit Kunststoffeinbettung des Knotens blieben ohne Erfolg.

4. Die von GLOGOWSKI und PRESTELE (28) beschriebenen Drahtziehstrümpfe erwiesen sich für die Belastbarkeitsprüfung der langen Daumenstrecksehne als unzureichend. Der Querschnitt der Sehne war dafür zu klein. Die Sehne rutschte durch den Strumpf.

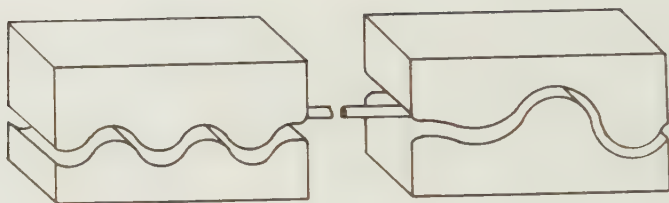


Abb. 3: Haltebacken mit
gleichmäßigen
Krümmungen

Haltebacken mit
abnehmenden
Krümmungen

5. Verwendung fand schließlich eine Konstruktion mit zwei Haltebacken, deren Krümmungsradien in Richtung der freien Sehnenlänge abnahmen (Abb. 3). Damit war eine Halteapparatur geschaffen, die den Zug allmählich auf die Sehne übertragen kann und damit den Sehnenriß an der Aufhängevorrichtung vermeidet.

Die beiden Haltebacken wurden jeweils durch schraubstock-ähnliche Zwingen aufeinandergepreßt. Um die Reibung zwischen der Sehne und dem Metall der Haltebacken noch zu erhöhen, wurden zusätzlich noch 2 mm dicke Moosgummiplatten dazwischen gelegt.

Nach der Formel für die mechanische Reibung

$$R = \mu \times G$$

war μ trotz der austretenden Sehnenflüssigkeit beim Zusammenpressen noch genügend groß. G konnte durch festeres Anziehen der Schraubenzwinge verändert werden. Die letzte Umlenkung lag noch weit innerhalb der fest zusammengepreßten Haltebacken. Dadurch war bei Belastung ein Reißen der Sehne wegen der fehlenden Scherkräfte in ihrer freien Länge gewährleistet. Die Kanten der Aufhängevorrichtung wurden abgerundet, um an diesen Stellen eine Kerbwirkung zu vermeiden. Für eine einwandfreie Befestigung der Sehnen zwischen den Haltebacken wurde von beiden Enden der Sehne ein Abschnitt von 4 cm zur Einspannung benötigt. Am distalen Sehnenende entsprachen die zur Einspannung erforderlichen 4 cm in etwa dem Bereich zwischen Daumengrundgelenk und der Insertion am Daumenendglied. Da in diesem Bereich Fasern auch am Daumengrundglied inserieren, war zwischen der freien Sehnenlänge zwischen Muskel und Insertionsstelle in vivo und der bei den Versuchen verwendeten freien Sehnenlänge eine gute Korrelation vorhanden. Um gleiche Versuchsbedingungen zu schaffen, wurde im Experiment eine freie Sehnenlänge von 90 mm gewählt. Der distale Abschnitt der Sehne bis zum Daumengrundgelenk wurde in allen Versuchen zur Einspannung verwendet. Die freie Sehnenlänge entsprach dann einem Bereich vom Daumengrundgelenk bis zur Umgehung des Muskelansatzes. Innerhalb des Muskels war die Sehne meist noch 4-5 cm weit zu verfolgen, wobei der Sehnenquerschnitt deutlich abnahm. Dieser Abschnitt im Muskel konnte aber zur Einspannung in die Aufhängevorrichtung noch gut verwendet werden.

3. Flächenbestimmung des Sehnenquerschnittes

3.1. Bisher angewendete Methoden

Eine Bestimmung des Sehnenquerschnittes muß vor dem Versuch erfolgen, da dies nach erfolgtem Riß wegen der Zerstörung der Sehnenstruktur im Rißbereich nicht mehr möglich ist.

Die bisher angewendeten Methoden wiesen zahlreiche Fehlerquellen auf:

1. Bei der Umfangmessung vor dem Riß der Sehne mit einem Seidenfaden und der anschließenden Bestimmung der Sehnen-durchmesser ging man von einem kreisförmigen oder elliptischen Sehnenquerschnitt aus. In wenigen Ausnahmefällen entsprach der Sehnenquerschnitt einer solchen geometrischen Form und auch dann nur an einzelnen Stellen im Verlaufe der Sehne. Ebenso waren auch Verfahren zu ungenau, die allein auf Durchmesserbestimmungen abgestellt waren.
2. Verfahren, bei denen nur ein Querschnitt von einem Ende der Sehne zur Bestimmung herangezogen wurden (2), waren für die vorliegenden Experimente unbrauchbar, weil sich die Querschnittsfläche im Verlaufe der Sehne deutlich ändert.
3. Aus demselben Grund wurden auch Verfahren abgelehnt, die auf Volumenbestimmungen nach dem Prinzip von Archimedes im Vergleich mit der Sehnenlänge beruhen ($q = \frac{V}{l}$; q = Sehnenquerschnitt; V = Volumen der Sehne; l = Sehnenlänge).
4. Wesentlich genauer war das Verfahren mit der Herstellung einer Negativform der Sehne (72). Die Negativform wurde dann in Scheiben geschnitten, fotografiert und das dem Sehnenquerschnitt entsprechende Loch mit Hilfe eines umgekehrten Lichtmikroskops vergrößert und planimetriert. Der Vorteil dieser Methode lag vor allem darin, daß die Querschnittsflächen noch nach dem Rißversuch an jeder beliebigen

Stelle des Sehnenverlaufes gemessen werden konnten. Wegen der kleinen Querschnittsfläche der Sehne des M. extensor pollicis longus fiel ein kleiner Fehler beim Bestimmen der Vergrößerung durch das Lichtmikroskop oder ein Fehler beim Planimetrieren so stark ins Gewicht, daß eine Meßfehlergrenze unter 1 % kaum erreichbar war.

Die Bemühungen für die Querschnittsmessung zielten auf die Einhaltung folgender Punkte ab:

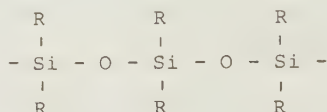
1. Die Querschnittsfläche der Sehne sollte auch nach dem Riß an jeder beliebigen Stelle insbesondere im Rißbereich vermessen werden können.
2. Die Lokalisation des geringsten Sehnenquerschnittes und dessen Fläche sollte nach dem Sehnenriß noch bestimmbar sein.
3. Der Meßfehler bei der Querschnittsmessung sollte unter 1 % liegen.
4. Der Zeitaufwand für vor dem Sehnenriß notwendigen Verrichtungen sollte möglichst gering gehalten werden, um größtmögliche Schonung der Sehne zu erreichen.

Um alle diese Bedingungen zu erfüllen, mußte das Verfahren mit einem Negativabdruck der Sehne vor dem Riß und die Vermessung der Abdrucke verfeinert werden.

3.2. Das Negativabdruckverfahren mit Silikonkautschuk

Für dieses Verfahren war eine Abformmasse mit sehr gutem Fließvermögen, einer kurzen Verarbeitungszeit nach Zugabe des Härters mit anschließend guter Verformungsstabilität notwendig. Außerdem sollte ein konstanter Schrumpfungsendwert erreicht werden. Nach zahlreichen Vorversuchen erfüllte der Silikonkautschuk RTV-M 426 (Fa. Wacker) in Verbindung mit den Härtern

T 11 und VP 3478 diese Bedingungen am besten. Der Wacker-Silikonkautschuk ist chemisch Glas und Quarz nahe verwandt. Im Gegensatz zum starren Grundgerüst des Glas- und Quarzgitters besteht dieses Silikon aus langen Ketten sich abwechselnder Silicium- und Sauerstoffatome. Jedes Siliciumatom trägt dabei zwei organische Gruppen:



Durch Zugabe des Härters werden die Ketten lose verknüpft. In dieses lose Netzwerk sind anorganische Füllstoffe eingebettet, welche die physikalischen und chemischen Eigenschaften mitbestimmen.

Der Silikonkautschuk RTV-M 426 ermöglichte durch seine niedere Viskosität bis 90 sec nach Einrühren der Härter ein problemloses Eingießen in die Abformwanne, in der die Sehne mit einem Zug von 2 kp eingespannt war. Aufgrund der guten Fließeigenschaften legte sich das Silikon eng und ohne Hohlraum- oder Blasenbildung an die Sehne an, ging aber wegen der guten Trennwirkung des Kunststoffes keine Verbindung mit dem organischen Material ein.

Nach den Angaben der Fa. Wacker benötigt die Masse RTV-M 426 in Kombination mit den angegebenen Härtern zum Erreichen der Formstabilität eine Zeit von ca. 6 Minuten. Für den Vorgang der Schrumpfung bis zu einem konstanten Endwert muß der Abdruck noch 72 Stunden offen gelagert werden (vgl. Abb. 4).

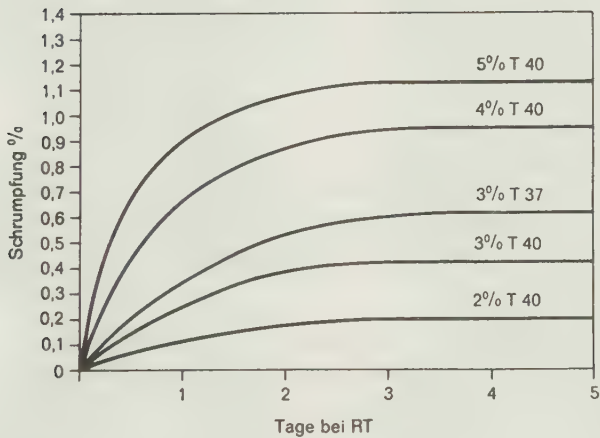


Abb. 4: Schrumpfung von Vulkanisaten in Abhängigkeit von Härtermenge und Härtertype

Dieser Endwert hing in hohem Maße von der Menge der eingemischten Härter ab. Daher wurde bei jeder Abformung in eine konstante Menge Silikon (50 g) jeweils eine Mischung von genau 1,1 ml Härter T 11 und 0,15 ml des Härters VP 3478, 30 sec lang eingerührt. Die genauen Härtermengen wurden bei Versuchen ermittelt, bei denen die zur Erreichung der Verformungsstabilität benötigte Zeit im Vordergrund stand. Je geringer diese Zeit war, desto weniger konnten schädliche Einflüsse auf das Sehngewebe einwirken. Ausschlaggebend für die gewählten Härtermengen waren Querschnittsmessungen von zwei Metallstäben mit einem konstanten Durchmesser von 3 bzw. 5 mm. Dabei hat sich gezeigt, daß bei sehr kurzen Zeiten bis zum Erreichen der

Verformungsstabilität große Fehler in der Querschnittsmessung auftraten. Der Grund dafür lag in der entsprechend kürzeren Einrührzeit und damit schlechteren Verteilung des Härters in der Silikonmasse. Für die angegebenen Härtermengen blieb einerseits genügend Zeit, den Härter in der Silikonmasse gut zu verteilen, andererseits war die Zeit bis zum Erreichen der Formstabilität mit 6 Minuten nicht zu lange, zumal die Sehne von Silikon eingebettet keinen Feuchtigkeitsverlust erlitt.

Zur Abformung wurde jede Sehne unter einem Zug von 2 kg in eine Wanne eingespannt. Die ersten 4 cm vom Knochenansatz der Sehnen her blieben bei den Messungen unberücksichtigt, da dieser Teil später in die Haltevorrichtung der Rißapparat geklemmt wurde.

Vermessen wurden die Sehnen zwischen 4 und 13 cm von ihrem Knochenansatz entfernt; das entsprach anatomisch etwa der Strecke vom Daumengrundgelenk bis zum proximalen Rand des Retinaculum extensorum.

Nach guter Vermischung mit dem Härter wurde der noch flüssige Silikonkautschuk in die 9 cm lange Abformwanne gegossen.

3 Minuten später war die Masse bereits hart. Eine sichere Verformungsstabilität war erst nach weiteren 3 Minuten erreicht. Man konnte die Sehne herausziehen und die Zerreißprüfung vornehmen.

Die nach 72 Stunden endgültig gehärtete Silikonmasse stellte nun die Negativform der Sehne dar. Sie wurde senkrecht zur Sehnenachse in jeweils 2 mm dicke Scheiben geschnitten. Die Fläche des Loches in der Mitte jeder Scheibe entsprach derjenigen des Sehnenquerschnittes. In der Abb. 5 sieht man 10 Querschnittsflächen einer Sehne. Die in der Mitte der rechten Seite liegende Silikonscheibe weist die kleinste Sehnenquerschnittsfläche auf. Diese Stelle entspricht in vivo dem Bereich knapp distal des Retinaculum extensorum.

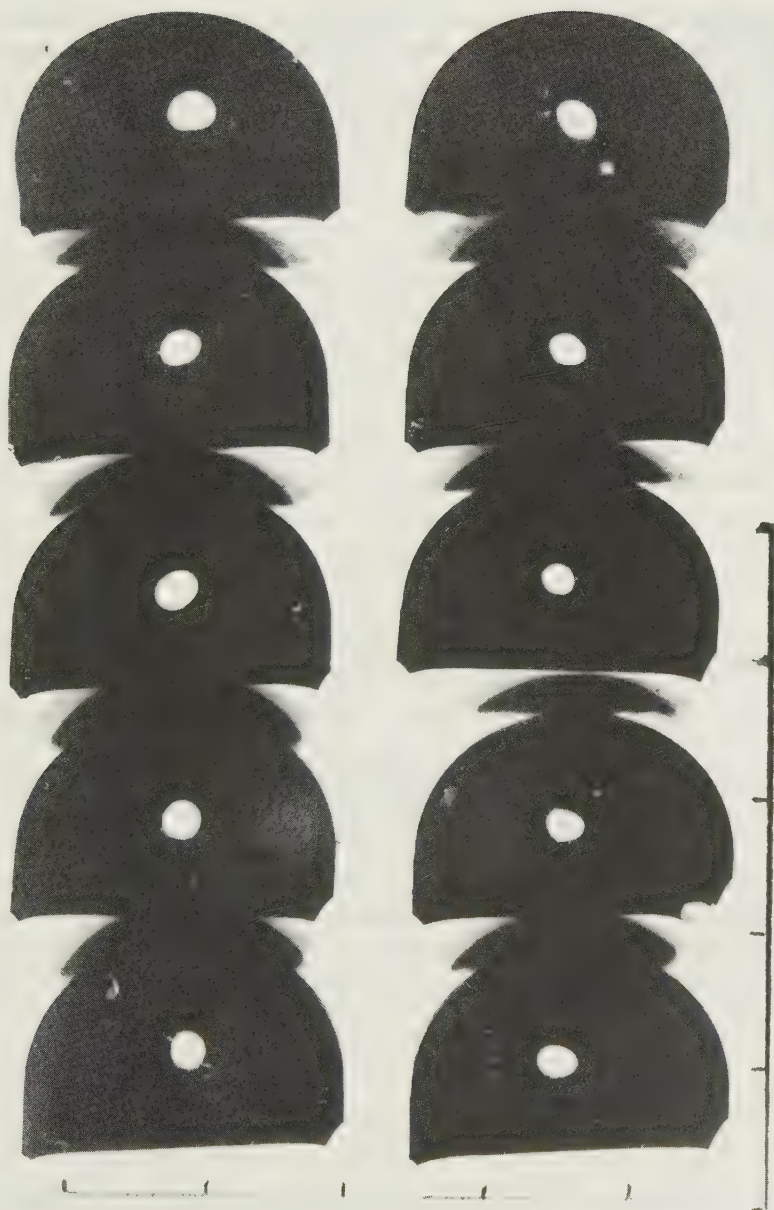


Abb. 5: Zur Querschnittsmessung vorbereitete Silikonscheiben

Eine genaue Kennzeichnung erlaubte eine exakte Zuordnung der Silikonscheiben zu dem entsprechenden Sehnenabschnitt. Daher war es möglich, den Querschnitt der Sehne an jeder beliebigen Stelle zwischen dem Daumengrundgelenk und dem Lig. carpi dorsalis zu bestimmen, ohne die Sehne dabei zu beschädigen. In der Regel wurden die Querschnittsflächen an 9-14 Stellen der Sehne bestimmt.

Die entsprechenden Silikonscheiben wurden nach 3 Kriterien ausgewählt:

1. In jedem Fall wurden die dem Reißbereich entsprechenden Flächen gemessen.
2. In jedem Zentimeter des für die Querschnittsbestimmung interessanten Sehnenbereiches fand wenigstens eine Messung statt; dabei wurden bevorzugt Flächen gemessen, die in diesem kurzen Abschnitt entweder sehr groß oder sehr klein waren.
3. Zur Ermittlung des geringsten Querschnittes wurden alle sehr klein scheinenden Flächen zur Messung ausgesucht.

3.3. Die Querschnittsmessung mit dem Präzisionsstereokomparator und der dabei auftretende Meßfehler

Für die Flächenberechnung des Sehnenquerschnittes mit Hilfe der Silikonabdrücke wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität München ein Verfahren entwickelt, das eine überaus große Genauigkeit der Messungen gewährleistete.

In einem Präzisionsstereokomparator^{*} (Fa. Zeiss) konnte der Umriß des Hohlraumes in der jeweiligen Silikonscheibe mit einer Meßmarke genau abgefahren werden. Die Meßpunkte wurden dann automatisch einem Koordinatensystem zugeordnet und registriert.

Zur Flächenmessung wurden die 2 mm dicken Silikonscheiben mit doppelseitig klebendem Tesafilm auf einer Glasplatte befestigt. Diese Glasplatte wurde dann mit Schraubklemmen an die mit ganz feinen Linien durchzogene Gitterplatte des PSK angepreßt. Durch ein Okular konnte man die Proben mit 12-facher Vergrößerung betrachten. Diffuses Licht, das von der Rückseite her auf die Glasplatten und Silikonscheiben strahlte, ließ das den Sehnenquerschnitten entsprechende Loch in den Silikonscheiben gut erkennen. Mit Handrädern wurde eine winzige kreisförmige Meßmarke (5/1000 mm Durchmesser) in die gewünschte Stellung gebracht.

Die Registrierung der Koordinaten auf Lochstreifen erfolgte automatisch. Ein Computer (TR 440) übernahm dann die komplizierte Flächenberechnung.^{**} Außerdem stellte er von jedem gemessenen Querschnitt eine Zeichnung her (s. Abb. 13 a-k).

Die Meßgenauigkeit des PSK war überaus groß. Es erforderte nicht viel Übung die Meßmarke mit einer Abweichung von höchstens 3/1000 mm auf einen gewünschten Punkt einzustellen.

* Das Gerät wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

** Die Flächenberechnung erfolgte im Leibnitz-Rechenzentrum der Technischen Universität München.

Flächenmessung eines Kreises mit dem PSK

Der PSK erfaßt bei der Flächenmessung nur die Fläche eines durch die Meßpunkte gebildeten Vielecks:



Abb. 6: Die gemessene Fläche eines Kreises mit dem PSK

Die in Abb. 6 schraffierten Flächen werden nicht mitberechnet, daher ist die gemessene Fläche zu klein. Die Größe dieses Fehlers hängt in entscheidendem Maße von der Anzahl der Meßpunkte ab. Der Fehler wird umso kleiner, desto mehr Punkte gemessen werden.

Theoretische Größe des Meßfehlers in Abhängigkeit von der Anzahl der Meßpunkte

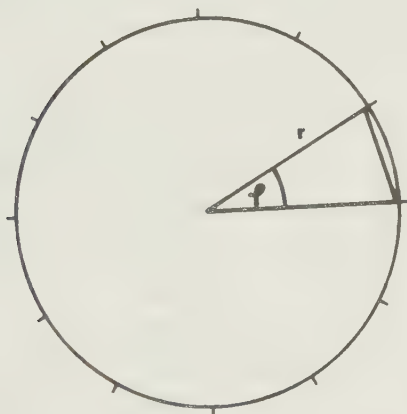


Abb. 7: Berechnung des mit dem PSK gemessenen Kreisfläche aus dem Winkel φ und dem Radius r

Die Fläche eines Dreiecks in dem zu vermessenden Kreis kann aus dem Winkel φ und dem Radius r berechnet werden (vgl. Abb. 7).

$$F = \frac{1}{2} r^2 \times \sin \varphi ;$$

n sei die Anzahl der Meßpunkte, die gleichmäßig auf dem Kreis verteilt liegen. Dann besteht die gemessene Fläche des Kreises aus n Dreiecken mit der jeweiligen Fläche

$$F = \frac{1}{2} r^2 \times \sin \varphi ;$$

und für φ gilt:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n}$$

Somit hat ein im PSK mit n Punkten gemessener Kreis die Fläche:

$$F_n = \frac{r^2 \times n}{2} \times \sin \frac{360^\circ}{n}$$

Die folgende Tabelle (Tab. 2) zeigt die Abhängigkeit des Meßfehlers von der Anzahl der Meßpunkte bei der Flächenmessung eines Einheitskreises mit dem PSK.

n	F_n [cm ²]	Δ [%]	n	F_n [cm ²]	Δ [%]
8	2,8284	9,97	17	3,0706	2,26
9	2,8925	7,93	18	3,0782	2,02
10	2,9389	6,45	19	3,0846	1,81
11	2,9735	5,35	20	3,0902	1,64
12	3,0000	4,51	21	3,0949	1,49
13	3,0207	3,85	22	3,0991	1,35
14	3,0372	3,32	23	3,1027	1,24
15	3,0505	2,90	24	3,1056	1,14
16	3,0615	2,55			

Tabelle 2: Theoretische Fläche (F_n) und theoretischer Flächenfehler (Δ) in % eines mit dem PSK gemessenen Einheitskreises in Abhängigkeit von der Anzahl der gleichmäßig auf dem Kreis verteilten Meßpunkte.

n = Anzahl der Meßpunkte

$$F_n = \frac{r^2 \times n}{2} \times \sin \frac{360^\circ}{n} \quad [\text{cm}] \quad (r = 1)$$

$$\Delta = 100 - \left(\frac{F_n}{\pi} \times 100 \right) \quad [\%]$$

Es ist zu erkennen, daß vor allem Messungen mit niedrigeren Punktzahlen großen Fehlern unterworfen wären. Um unter die 1 % Fehlergrenze zu gelangen, müßten Messungen mit wenigstens 26 Punkten durchgeführt werden. Dies würde die Dauer der Flächenmessung erheblich verlängern. Deswegen wurden zwischen jeweils zwei Meßpunkten 4 weitere interpoliert. Diese Interpolationspunkte liegen auf einer Kurve, deren Krümmungsänderung zwischen zwei benachbarten Meßpunkten auf einem Minimum gehalten wird; in dem Beispiel des Einheitskreises liegen sie also genau auf der Kreislinie. Dadurch wird der Fehler der PSK-Meßmethode um den Faktor 25 geringer.

Die folgende Tabelle (Tab. 3) sowie die Abb. 8 zeigen den Unterschied zwischen Flächenfehlern mit und ohne interpolierten Punkten:

nicht interpolierte Fläche			interpolierte Fläche			$\Delta_1 - \Delta_2$
n	F_n	Δ_1	n	F_n	Δ_2	
10	2,9389	6,45	50	3,1333	0,26	6,19
11	2,9735	5,35	55	3,1348	0,22	5,13
12	3,0000	4,51	60	3,1359	0,18	4,33
13	3,0207	3,85	65	3,1367	0,16	3,69
14	3,0372	3,32	70	3,1374	0,13	3,19
15	3,0505	2,90	75	3,1379	0,12	2,78
16	3,0615	2,55	80	3,1384	0,10	2,45
17	3,0706	2,26	85	3,1387	0,09	2,17
18	3,0782	2,02	90	3,1390	0,08	1,94
19	3,0846	1,81	95	3,1393	0,07	1,74
20	3,0902	1,64	100	3,1395	0,07	1,57

Tabelle 3: Interpolierte und nicht interpolierte Flächen eines Einheitskreises in Abhängigkeit von der Anzahl der Meßpunkte

n = Anzahl der Meßpunkte

$$F_n = \frac{r^2 \times n}{2} \times \sin \frac{360^\circ}{n} \quad (r = 1)$$

Δ = Differenz zwischen π und F_n in %

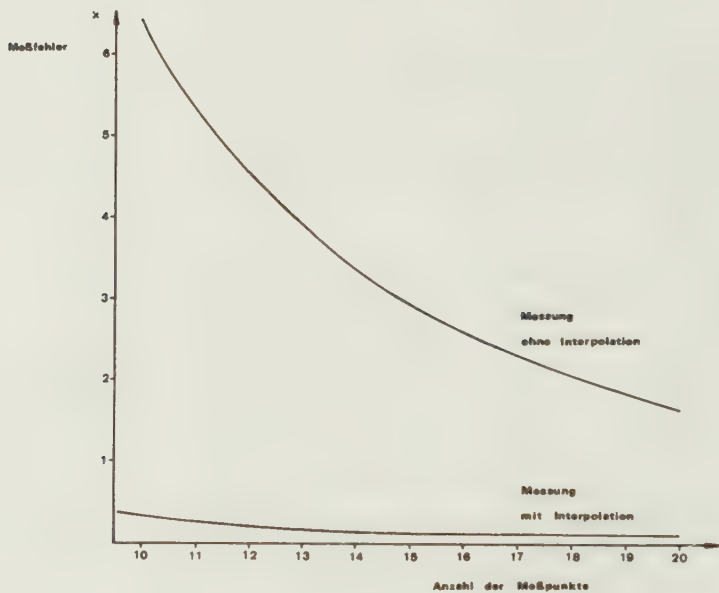


Abb. 8: Fehler bei der Flächemessung eines Einheitskreises mit und ohne Interpolation von Zwischenpunkten

Bei der Querschnittsmessung eines präzise gearbeiteten Metallstabes mit dem Durchmesser $d = 3 \text{ mm}$, ergaben sich folgende Werte für eine verschiedene Anzahl von Meßpunkten, die jeweils möglichst gleichmäßig verteilt auf dem Kreis lagen (vgl. Tab. 4).

Anzahl der Meßpunkte	Fläche bei 3 Messungen ohne Interpolation (mm^2)	Meßfehler (%)	Fläche bei 3 Messungen mit Interpolation (mm^2)	Meßfehler (%)
8	$6,341 \pm 0,004$	10,30	$7,029 \pm 0,006$	0,56
10	$6,595 \pm 0,010$	6,71	$7,043 \pm 0,006$	0,36
12	$6,734 \pm 0,011$	4,73	$7,048 \pm 0,010$	0,29
14	$6,820 \pm 0,012$	3,51	$7,052 \pm 0,014$	0,23
16	$6,861 \pm 0,015$	2,94	$7,058 \pm 0,021$	0,15
18	$6,923 \pm 0,013$	2,15	$7,067 \pm 0,010$	0,02

Tabelle 4: Meßfehler der Flächenmessung eines kreisförmigen Metallstabes $r = 1,5 \text{ mm}$ ($F = 7,0686 \text{ mm}^2$) in Abhängigkeit von der Anzahl der gemessenen Punkte

Die Flächenmessung einer Ellipse mit der Fläche ($F = 2\pi$)
ergab folgende Werte:

	Meßpunkte	Fläche ohne Interpolation	Fläche mit Interpolation	Fehler
Messung 1	12	5,905	6,282	0,02 %
Messung 2	12	6,000	6,275	0,13 %

Tabelle 5: Flächenmessungen von Ellipsen mit dem PSK bei
unterschiedlich angeordneten Meßpunkten

Bei Messung 1 waren die Meßpunkte im Bereich der stärksten
Krümmung in kürzerem Abstand gelegen als bei Messung 2,
bei der sie ohne Rücksicht auf Krümmungsänderung auf der
Ellipse verteilt waren (vgl. Abb. 9 und Tab. 5).



Abb. 9:
Meßpunkte im Bereich
stärkerer Krümmung
vermehrt (Messung 1)

Meßpunkte ungleich-
mäßig verteilt
(Messung 2)

Eine Häufung von Meßpunkten im Bereich starker Krümmungen verringert die nicht gemessene Fläche (schraffiert in Abb. 9) und damit den Meßfehler.

Der Unterschied zwischen den theoretisch errechneten und den in der Praxis aufgetretenen Meßfehlern entspricht den Erwartungen. Der Praxiswert ist nur geringgradig größer als der Theoriewert (vgl. Tab. 6).

Anzahl der Meßpunkte	Fehler in % ohne Interpolation		Fehler in % nach Interpolation	
	Theorie	Praxis	Theorie	Praxis
8	9,97	10,30	0,41	0,56
10	6,45	6,71	0,26	0,36
12	4,51	4,73	0,18	0,29
14	3,32	3,51	0,13	0,23
16	2,55	2,94	0,10	0,15
18	2,02	2,05	0,08	0,02

Tabelle 6: Vergleich zwischen gemessenen Flächen eines Kreises und den theoretischen Werten bei verschiedener Anzahl von Meßpunkten (vgl. auch Tab. 2 und Tab. 4).

Die Methode der Flächenbestimmung mit dem PSK ist also sehr genau. Die Genauigkeit läßt sich durch eine Vermehrung der Meßpunkte beinahe beliebig erhöhen. Der Meßfehler liegt z.B. bei einer Flächenbestimmung durch 20 Meßpunkte sicher unter 0,1 %.

3.4. Meßfehler bedingt durch den Silikonkautschuk

Ein Fehler größeren Ausmaßes konnte durch den Silikonkautschuk, mit dem die Sehnen eingegossen wurden, zustande kommen.

Der verwendete Silikonkautschuk sollte folgende Merkmale, die für die Querschnittsmessung von entscheidender Bedeutung waren, aufweisen:

1. Schnelle Härtung
2. Geringe Verformbarkeit nach der Vulkanisation
3. Erreichen eines konstanten Schrumpfungswertes

Die geringe Verformbarkeit nach der Vulkanisation wurde gefordert, um Fehler, die durch unterschiedliche Andruckkräfte der Silikonquerschnitte an die Meßscheibe des PSK zustande kommen, möglichst auszuschließen. Die Masse RTV-M 426 erfüllte im Gegensatz zum Silikonkautschuk RTV-M 457 diese Bedingung weitgehend (vgl. Tab. 7).

	RTV-M 426					RTV-M 547	
	Probe Nr.					Probe Nr.	
	1	2	3	4	5	1	2
große Andruckkraft	3,31	5,17	7,59	8,22	19,08	7,81	19,17
geringe Andruckkraft	3,32	5,19	7,59	8,27	19,09	7,89	19,59
Differenz in %	0,3	0,4	0,0	0,6	0,1	3,5	2,1

Tabelle 7: Abhängigkeit der im PSK gemessenen Fläche von der Verformbarkeit des verwendeten Silikonkautschuks

Bei den Querschnittsmessungen muß man trotz der guten Ergebnisse bestrebt sein, die Andruckkräfte möglichst gleich groß zu halten. Der Fehler, der durch die Verformbarkeit der Silikonquerschnitte hervorgerufen werden könnte, war dadurch äußerst gering.

Die Erreichung eines konstanten Schrumpfungsendwertes dagegen erwies sich als wesentlich problematischer. Um den Fehler von seiten des Abdruckmittels möglichst niedrig zu halten, war es von entscheidender Bedeutung, daß bei jedem Versuch genau die gleiche Menge Härter in einer bei jedem Versuch gleichen Menge Silikon möglichst gleichmäßig verteilt wurde. Lag die zugegebene Härtermenge nur um 0,05 ml über oder unter der normal eingerührten Menge, so zeigte sich neben einer veränderten Schrumpfung auch eine Änderung der Viskosität des Silikonkautschuks. Durch längeres Rühren wurde eine bessere Verteilung des Härters in der Silikonkautschukmasse erreicht. Schlechtere Verteilung würde bedeuten, daß das Silikon an einigen Stellen mehr, an anderen weniger schrumpft. Unterschiedliche Einrührzeiten und mehrmalige Querschnittsmessungen an verschiedenen Stellen eines Metallstabes ($r = 1,495 \text{ mm}$), der mit Silikon eingebettet wurde, bestätigten diese Aussage (vgl. Tab. 8).

Einrührdauer:	10 sec		15 sec		20 sec			30 sec	
größte Fläche [mm ²]	6,68	6,67	6,73	6,70	6,80	6,79	6,62	6,61	6,60
kleinste Fläche [mm ²]	6,51	6,56	6,55	6,56	6,64	6,59	6,58	6,56	6,55
Differenz	0,17	0,11	0,18	0,14	0,16	0,20	0,04	0,05	0,05

Tabelle 8: Flächendifferenzen bei der Querschnittsmessung eines Metallstabes und unterschiedlicher Einrührdauer des Härters in die Silikonmasse.

Bei Durchmischungszeiten von weniger als 30 sec entstehen Flächenunterschiede, die nicht durch Meßfehler erklärt werden können. Die große Abweichungen von der später ermittelten Durchschnittsfläche ($F = 6,61 \text{ mm}^2$) sind auf die schlechte Verteilung des Härters in der Silikonmasse zurückzuführen.

72 Stunden nach Zugabe des Härters hat die Schrumpfung der Silikone den maximalen Wert erreicht (Fa. Wacker). Daß dieser Wert über längere Zeit konstant bleibt, veranschaulicht eine Untersuchung, wobei die Fläche eines Silikonquerschnittes an verschiedenen Tagen gemessen wurde (vgl. Tab. 9).

Zeitpunkt nach Herstellung des Abdrucks	Anzahl der Meßpunkte	Fläche (mm ²)
nach 72 Stunden.	13	5,323
nach 96 Stunden	14	5,325
nach 10 Tagen	12	5,336
nach 17 Tagen	12	5,322

Tabelle 9: Flächen eines Silikonquerschnittes an verschiedenen Tagen nach Herstellung des Abdruckes

Die Flächendifferenzen liegen innerhalb der Meßgenauigkeit (vgl. Tab. 4). Eine weitere Schrumpfung findet 72 Stunden nach Härterzugabe nicht mehr statt.

Um diesen Schrumpfungswert für die verwendete Härterkombination zu ermitteln, wurden von 4 präzise hergestellten Metallstangen verschiedener Durchmesser, deren Flächen ungefähr den Querschnittsflächen von M. extensor pollicis longus Sehnen entsprachen, Silikonabdrücke hergestellt, und drei Tage später deren Querschnittsflächen mit dem PSK bestimmt.

Diese Versuche wurden dreimal durchgeführt. Außerdem wurden die Flächen der Metallstangenquerschnitte auch direkt im PSK gemessen. Die Schrumpfung konnte dann durch den Vergleich der Sollflächen mit denen der Silikonquerschnitte ermittelt werden. Die Sollflächen wurden aus den bekannten Radien der 4 Metall-

stangen errechnet. Die Flächen der direkt im PSK gemessenen Querschnitte der Metallstangen durften theoretisch nur um ca. 0,18 % (bei 12 Meßpunkten) kleiner sein als die Sollflächen (vgl. Tab. 10).

d [mm]	2,025	2,99	3,37	4,03
F _S [mm ²]	3,221	7,022	8,920	12,756
F _M [mm ²]	3,214	7,009	8,901	12,741
F _I [mm ²]	3,047 ^{+0,045}	6,610 ^{+0,04}	8,410 ^{+0,03}	12,193 ^{+0,05}
Δ ₁ [%]	0,22	0,19	0,21	0,12
Δ ₂ [%]	5,40	5,86	5,72	4,44

Tabelle 10: Flächen der im PSK gemessenen Silicon- und Metallstangenquerschnitte im Vergleich mit der Sollfläche

d = Durchmesser der Metallstange

F_S = Sollfläche

F_M = im PSK gemessene Fläche der Metallquerschnitte

F_I = im PSK gemessene Fläche der Siliconquerschnitte
(= Istfläche)

Δ₁ = F_S-F_M = Flächenmeßfehler in %, der theoretisch bei 0,18 % liegen sollte

Δ₂ = F_S-F_I = Differenz zwischen Sollfläche (F_S) und Istfläche (F_I) in %

Mittelwert Δ₂ = 5,35 %

Die Differenz (F_S-F_I) beträgt im Durchschnitt also 5,35 %.

Dieser Wert setzt sich zusammen aus der Schrumpfung der Silikon- und dem Fehler, der durch die PSK-Flächenmessung zustande kommt (vgl. Kap. 3.3.). Dieser Meßfehler war aber verglichen mit den Schrumpfungsunterschieden so klein, daß er nur zu geringgradigen Ungenauigkeiten führte.

Die Fläche eines Silikonquerschnittes war also hauptsächlich durch die Schrumpfung der Silikone verglichen mit der Sollfläche um 5,35 % zu klein. Jede gemessene Fläche mußte daher durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor verbessert werden. Dieser Faktor hatte die Größe $\frac{100}{100-5,35} = 1,056$, d.h., jede Fläche mußte um 5,65 % ($5,35 \times 1,056$) vergrößert werden, um den Schrumpfungsfehler auszugleichen.

Die Genauigkeitsberechnung dieser PSK-Meßmethode ließ sich wegen der anderen Querschnittsform nicht ganz vorbehaltlos auf die Sehnenquerschnittsmessung übertragen, aber es gab doch einige Vergleichsmöglichkeiten:

- a) Die Querschnittsflächen vieler Sehnen des M. extensor longus entsprachen weitgehend einer Eiform (vgl. Abb. 13 a-k). Manche Flächen hatten sogar annähernd die Form eines Kreises.
- b) Der Schrumpfungsgrad der Silikonmasse war unabhängig von der Form und Größe des Probekörpers.
- c) Die Differenzen zwischen interpolierten und nicht interpolierten Sehnenquerschnittsflächen waren konstant um durchschnittliche 0,6 % größer als die theoretisch bei einem Kreis errechneten Differenzen (s. Tab. 11).

n	Δ_1	Δ_2	Δ
11	5,77 $\pm$ 0,48	5,13	0,64
12	4,79 $\pm$ 0,29	4,33	0,46
13	4,23 $\pm$ 0,49	3,69	0,54
14	3,78 $\pm$ 0,39	3,19	0,59
15	3,53 $\pm$ 0,48	2,78	0,75
16	3,13 $\pm$ 0,52	2,45	0,68
17	2,83 $\pm$ 0,40	2,17	0,66
18	2,40 $\pm$ 0,29	1,94	0,46
19	2,29 $\pm$ 0,38	1,74	0,55
20	1,87 $\pm$ 0,33	1,57	0,30
			MW 0,57

Tabelle 11: Differenz der interpolierten und nicht interpolierten Sehnenquerschnittsflächen in der Praxis im Vergleich mit der Differenz der interpolierten und nicht interpolierten Flächen eines Einheitskreises bei einer verschieden großen Anzahl von Meßpunkten.

n = Anzahl der Meßpunkte

Δ_1 = Differenz der interpolierten und nicht interpolierten Sehnenquerschnittsflächen in %. Diese Werte wurden aus 227 gemessenen Sehnenquerschnittsflächen ermittelt.

Δ_2 = Differenz der interpolierten und nicht interpolierten Flächen eines Einheitskreises in % (vgl. Tab. Nr. 3).

$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$

Aus voranstehender Tabelle ist auch zu erkennen, daß die Differenzen zwischen interpolierten und nicht interpolierten Flächen von Sehnenquerschnitten mit ansteigender Anzahl von Meßpunkten abnehmen. Anhand dieser relativ konstanten Werte, war es möglich, nachträglich zu überprüfen, ob an wichtigen Stellen (z.B. starken Krümmungen der Querschnittsfläche) evtl. zu wenig Meßpunkte gesetzt wurden. Die Differenz zwischen interpolierten und nicht interpolierten wäre auffallend groß und würde zu Nachmessungen Anlaß geben.

Um den Einfluß unterschiedlich angeordneter Meßpunkte festzustellen, wurde die Querschnittsfläche einer Sehne möglichst genau bestimmt um dann die Wirkung von absichtlich begangenen Fehlern zu erkennen:

1. Messung: Bei 60 Meßpunkten liegt der Meßfehler nach Interpolation unter 0,01 %.
2. und 3. Messung: Verschiedene Anzahl von Meßpunkten ohne absichtlichen Fehler.
4. bis 6. Messung: Entweder in verhältnismäßig gerade verlaufenden Strecken oder in Krümmungen zuwenig Meßpunkte.

Anzahl der Meßpunkte	Fläche ohne Interpolation von Zwischenpunkten (mm)	Fläche mit Interpolation von Zwischenpunkten (mm)	Meßfehler (%)	Bemerkungen
60	13,824	13,858	0	sehr genauer Wert
49	13,767	13,852	0,04	ohne absichtlichen Fehler.
19	13,327	13,816	0,30	
46	13,386	13,772	0,62	Fehler: In Krümmungen viel zu weit auseinanderliegende Meßpunkte
23	13,440	13,767	0,66	Fehler: Lange ziemlich gerade verlaufende Strecken mit zu wenig Meßpunkten

Tabelle 12: Meßfehler durch unterschiedlich angeordnete Meßpunkte

Voranstehende Tabelle zeigt, daß die interpolierten Flächen trotz der Meßfehler nicht mehr als 0,66 % voneinander abweichen. Ohne absichtliche Fehler beträgt die Abweichung nur 0,30 %.

IV. ERGEBNISSE

1. Die maximale Belastbarkeit der Sehne des M. extensor pollicis longus

Der Rißvorgang beginnt (A in Abb. 10) bei einer Vorspannung der Sehne von 5 kp. Das aufgezeichnete Rißbild zeigt keinen linearen, vielmehr einen unregelmäßigen Anstieg (B in Abb. 10). Das kann wohl dadurch erklärt werden, daß bei dem Belastungsvorgang die einzelnen Sehnenfaserbündel nicht gleichzeitig reißen.

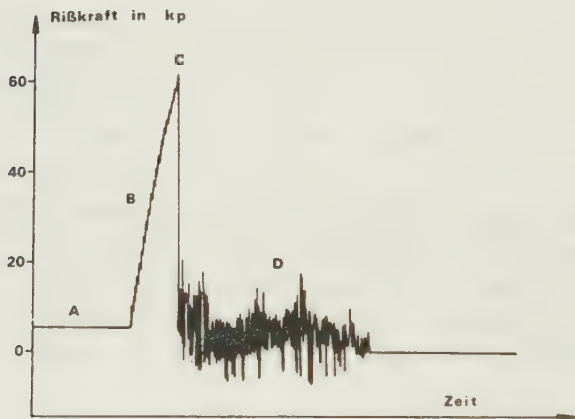


Abb. 10: Kurvenverlauf eines Sehnenrisses

Der Kurvengipfel (C in Abb. 10) entspricht der maximal aufgebrauchten Kraft, welche zum Riß der Sehne geführt hat. Die Nachschwingungen (D in Abb. 10) kommen durch Schwingungen des Fallbären zustande, die durch den heftigen Aufschlag des Fallgewichts hervorgerufen werden.

Bei der Auswertung der Reißkurven von 27 Sehnen männlicher und 16 Sehnen weiblicher Individuen betrug die minimale Reißkraft 26 kp, die maximale 99 kp. Im Durchschnitt riß die Sehne bei $59,1 \pm 17,7$ kp.

Die folgende Tabelle (Tab. 13) zeigt den Unterschied der Reißfestigkeit von Sehnen weiblicher und männlicher Individuen:

	♂	♀	Gesamt
n	27	16	43
Durchschnittliche Reißkraft	$65,4 \pm 16,5$ kp	$48,3 \pm 13,8$ kp	$59,1 \pm 17,7$ kp
geringste Reißkraft	36 kp	26 kp	26 kp
größte Reißkraft	99 kp	66 kp	99 kp

Tabelle 13: Reißfestigkeit von Sehnen weiblicher und männlicher Individuen

Dagegen bestand kein wesentlicher Unterschied in der maximalen Belastbarkeit zwischen Sehnen, welche im Bereich des geringsten Querschnittes rissen ($n = 29$; Mittelwert ($\bar{x}$) = $58,1$ kp; $s_x = 18,6$ kp) und Sehnen, die nicht im Bereich des geringsten Querschnittes rissen ($n = 14$; Mittelwert ($\bar{x}$) = $61,2$ kp; $s_x = 15,9$ kp).

2. Lokalisation des Reißbereiches

In 30 von 43 Fällen (70 %) riß die Sehne im Bereich des Retinaculum Extensorum.

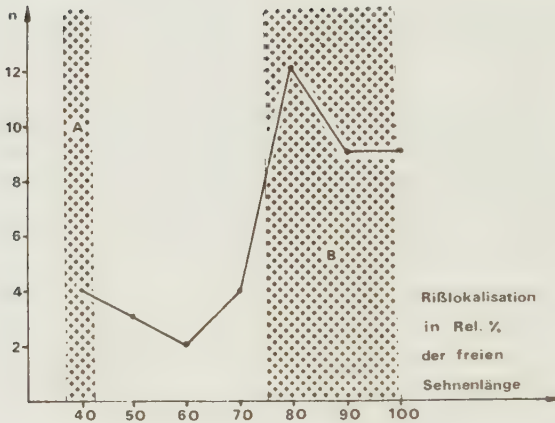


Abb. 11: Rißlokalisation im Sehnenverlauf

A = Bereich des Daumengrundgelenks

B = Bereich des Retinaculum extensorum

Im Bereich des Daumengrundgelenks rissen 4 Sehnen (9 %). Die restlichen 9 verteilten sich relativ gleichmäßig auf einen Bereich, der in vivo dem Sehnenverlauf zwischen Daumengrundgelenk und drittem Sehnenfach entspricht.

Das Geschlecht zeigte keinen Einfluß auf die Lokalisation des Rißbereiches.

3. Der Rißbereich

Wegen des nicht immer quer zum Sehnenverlauf erfolgten Risses ist es besser, von Rißbereichen anstatt von Rißstellen zu sprechen. Das Aussehen der Sehnenrißbereiche ließ sich auf wenige Grundformen reduzieren: Bei nicht gespaltenen Sehnen gab es folgende 2 Rißformen:

- a. den Sehnenriß quer zur Hauptachse mit Abspaltung einer kleinen Sehnenfasergruppe;
- b. den Sehnenriß schräg zur Hauptachse.

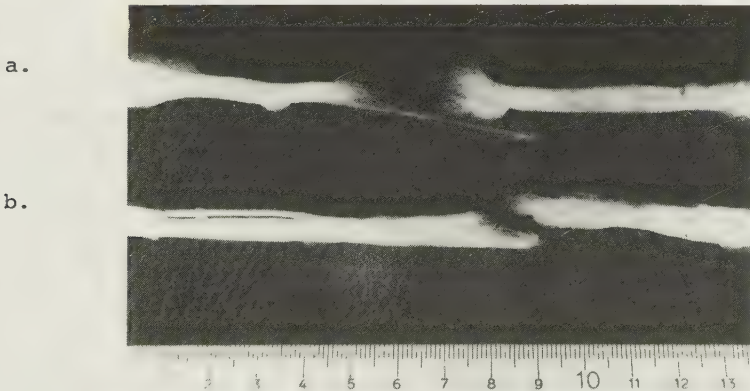


Abb. 12: Verschiedene Formen des Rißbereiches

Bei beiden Rißformen konnten in der Peripherie der Sehnen kleine, bis zu 6 cm lange Sehnenfasergruppen beobachtet werden (Abb. 12 a).

Zur Bestimmung der Rißlokalisation wurden diese nur einen kleinen Teil des Sehnendurchmessers ausmachenden Sehnenanteile nicht berücksichtigt, da sie erst in der Endphase des Sehnenrisses entstanden und vermutlich auf Scherkräfte zurückzuführen waren.

Tabelle 14:

Häufigkeit der einzelnen Rißformen:

Riß quer zur Hauptachse:	8 x
Riß diagonal zur Hauptachse:	17 x
Riß mit Abspaltung einer kleinen Sehnenfasergruppe:	18 x

Bei gespaltenen Sehnen rissen die Anteile in acht Fällen nahezu an gleicher Stelle. In sechs Fällen fanden sich die Rißbereiche der beiden Sehnenanteile in einem Abstand von mehr als einem Zentimeter.

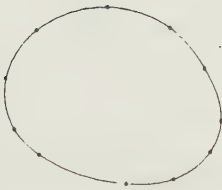
4. Querschnitte

Die zur Querschnittsflächenmessung verwendeten Silikonquerschnitte wurden nach den bereits beschriebenen Kriterien ausgewählt. So gelangten von jeder Sehne 9 bis 14 Querschnitte insbesondere Querschnitte des Rißbereiches und der Stelle des geringsten Querschnittes zur Messung.

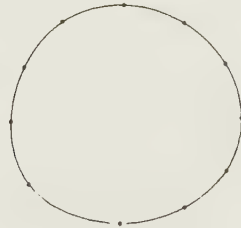
4.1. Die Querschnittsänderung im Verlaufe der Sehne

Aufgrund der bei diesen Experimenten angewendeten Methode der Querschnittsbestimmung war es möglich, nachträglich den Querschnitt an jeder beliebigen Stelle der Sehne zu messen.

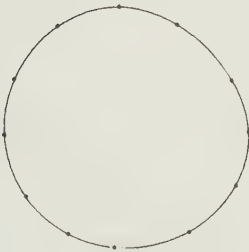
Abb. 13 a-k: Computerzeichnungen der Querschnittsflächen einer Sehne



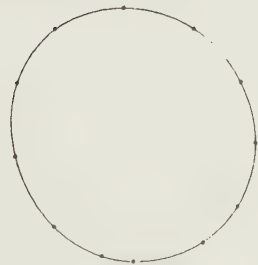
13 a: $q = 4,24 \text{ mm}^2$



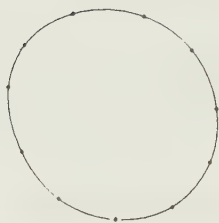
13 b: $q = 5,65 \text{ mm}^2$



13 c: $q = 6,46 \text{ mm}^2$



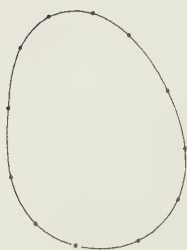
13 d: $q = 6,93 \text{ mm}^2$



13 e: $q = 5,13 \text{ mm}^2$



13 f: $q = 4,24 \text{ mm}^2$



13 g: $q = 4,98 \text{ mm}^2$



13 h: $q = 4,32 \text{ mm}^2$



13 i: $q = 5,13 \text{ mm}^2$



13 k: $q = 7,32 \text{ mm}^2$

Abb. 14 a-g: Querschnittsverlauf von langen Daumenstrecksehnen

Durchgehende Linie: Sehne der linken Hand

Gestrichelte Linie: Sehne der rechten Hand

Pfeil: Haupttrißstelle

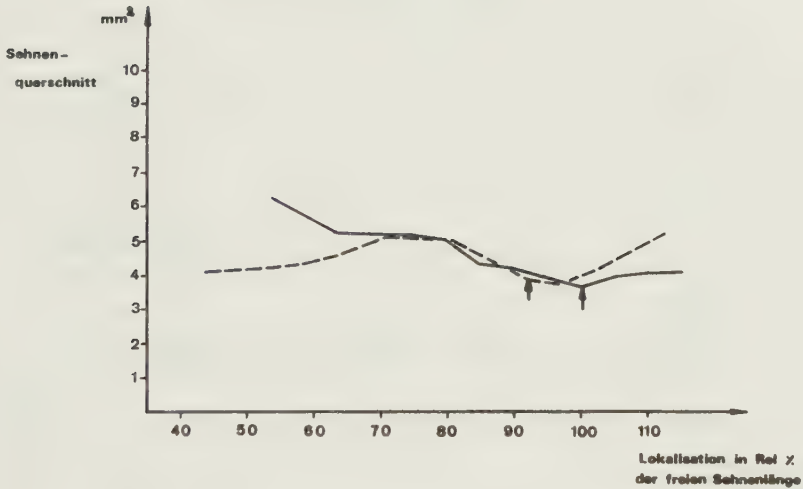


Abb. 14 a: Weiblich, 27 Jahre, Gewicht 53 kg, Größe 171 cm

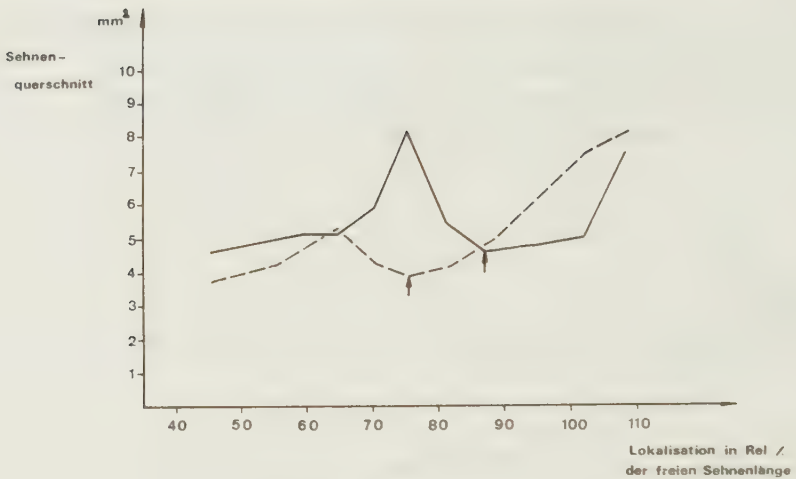


Abb. 14 b: Weiblich, 35 Jahre, Gewicht 72 kg, Größe 159 cm

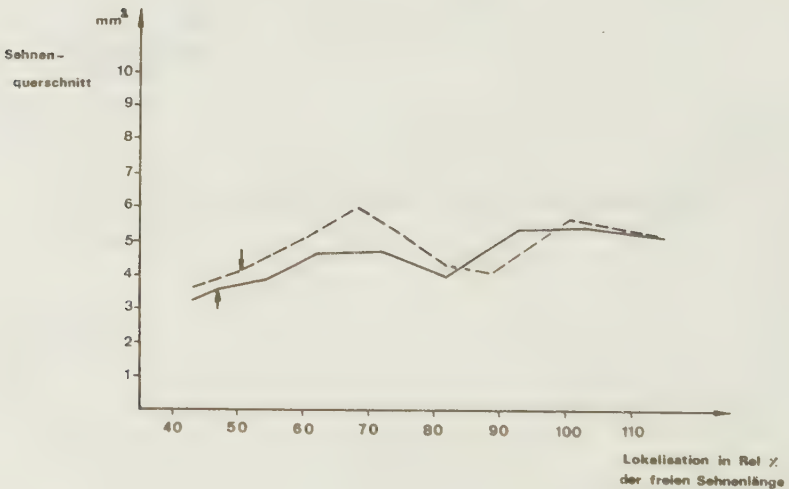


Abb. 14 c: Weiblich, 40 Jahre, Gewicht 85 kg, Größe 153 cm

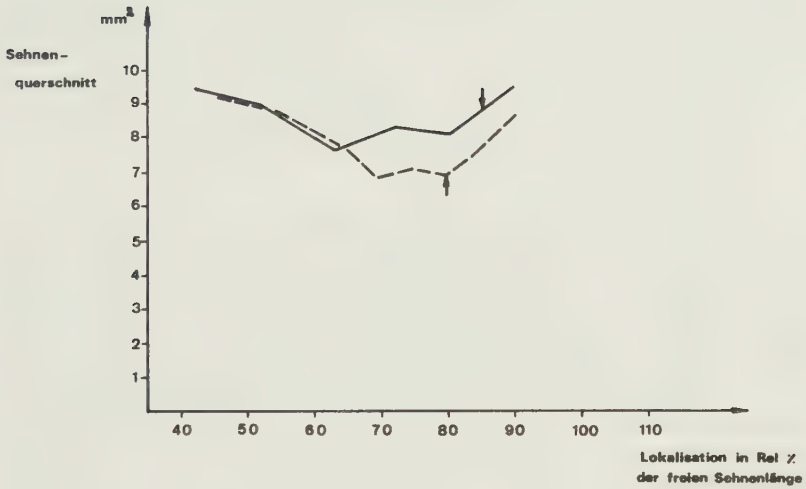


Abb. 14 d: Männlich, 16 Jahre, Gewicht 70 kg, Größe 176 cm

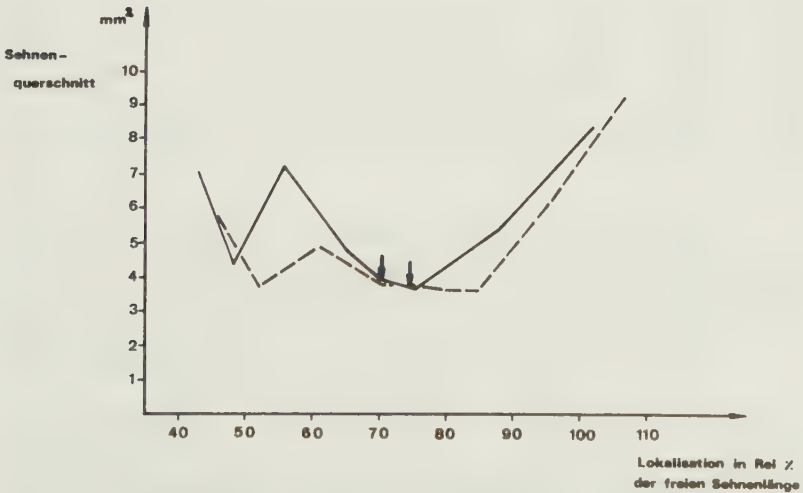


Abb. 14 e: Männlich, 29 Jahre, Gewicht 83 kg, Größe 166 cm

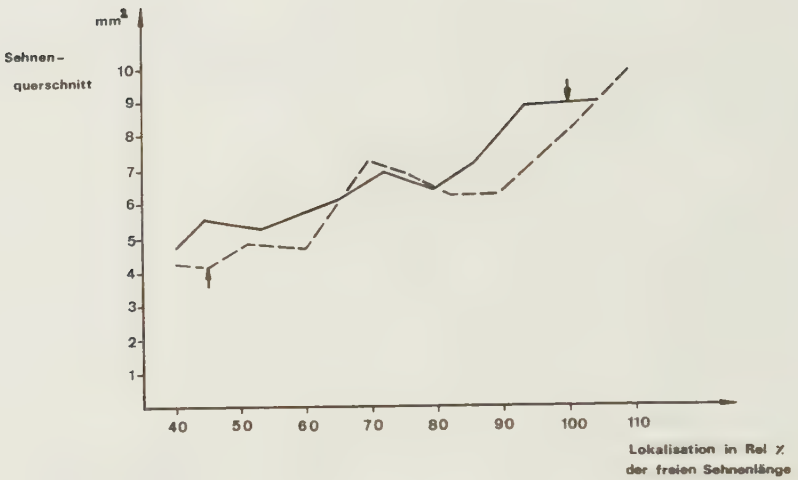


Abb. f: Männlich, 47 Jahre, Gewicht 78 kg, Größe, 181 cm

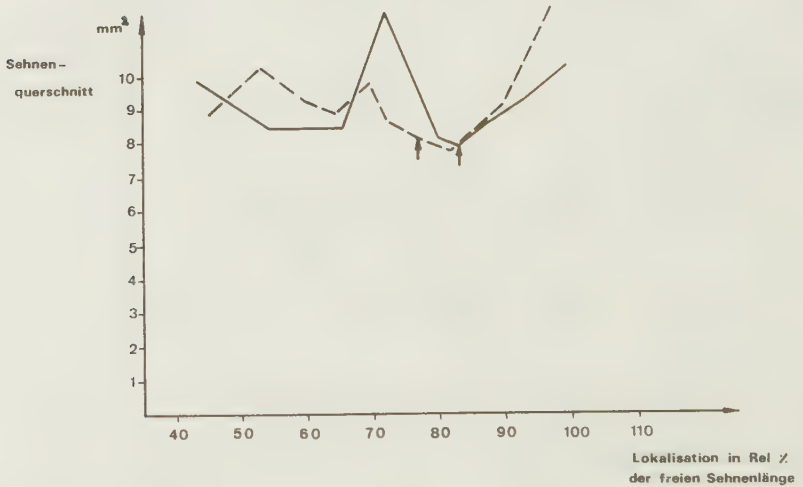


Abb. g: Männlich, 51 Jahre, Gewicht 49 kg, Größe 173 cm

Zwischen der äußeren Form der Sehne und der Querschnittsfläche besteht nach Auswertung der Computerzeichnungen kein Zusammenhang (vgl. Abb. 13 a-k). Die Querschnittsflächen im Verlaufe der Sehnen sind nicht an jeder Stelle gleich groß. Vergleicht man den Querschnittsverlauf verschiedener Sehnen miteinander, so ist keine Regelmäßigkeit der Änderungen festzustellen (Abb. 14 a-g).

4.2. Der mittlere Querschnitt der Sehnen

Sehr deutliche geschlechtliche Unterschiede bestanden auch bei der Bildung eines mittleren Querschnittes aus den Messungen einer Sehne. Dieser Wert war zwar in hohem Maße der geeigneten Auswahl der Silikonquerschnitte unterworfen. Messungen aller Sehnenquerschnitte einer Sehne zeigten aber im Vergleich mit den ausgewählten Querschnitten eine ausreichende Genauigkeit dieser Methode an. Es waren nur Unterschiede bis zu $0,19 \text{ mm}^2$ festzustellen.

Der mittlere Querschnitt der einzelnen Sehnen lag bei den männlichen Individuen im Durchschnitt bei $7,63 \pm 1,41 \text{ mm}^2$ und bei den Frauen bei $5,83 \pm 1,14 \text{ mm}^2$ (vgl. Tab. 17).

4.3. Der geringste Querschnitt der Sehnen und dessen Lokalisation

Der jeweils geringste Querschnitt jeder Sehne lag im Mittel bei $5,44 \pm 1,47 \text{ mm}^2$, bei den 27 männlichen Sehnen zwischen $3,81$ und $8,46 \text{ mm}^2$ (Mittelwert $5,96 \pm 1,49 \text{ mm}^2$), und bei den 16 Sehnen weiblicher Individuen zwischen $3,43$ und $6,36 \text{ mm}^2$ (Mittelwert $4,56 \pm 0,95 \text{ mm}^2$).

Wie Abb. 15 zeigt, ist die Stelle des geringsten Querschnittes im Verlaufe der Sehnen am häufigsten im Bereich des Daumengrundgelenkes und knapp distal des Retinaculum extensorum zu finden.

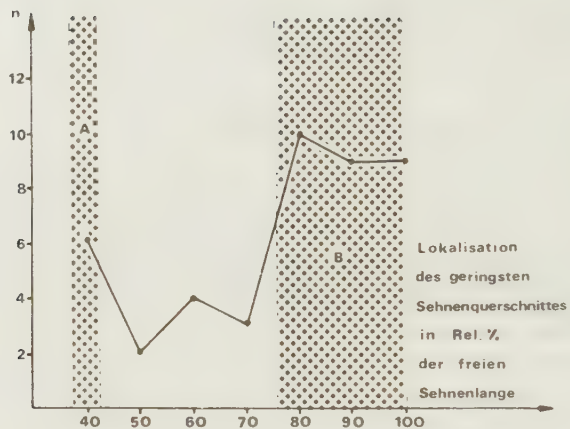


Abb. 15: Lokalisation des geringsten Sehnenquerschnittes

Lokalisation in Rel. % der freien Sehnen- länge		Rißstelle n	geringster Querschnitt n	Überein- stimmung n
Daumengrund- gelenk:	36 - 45	4	6	2
	46 - 55	3	2	0
	56 - 65	2	4	1
	66 - 75	4	3	3
Bereich der radialen Sehnenablen- kung	76 - 85	12	10	9
	86 - 95	9	9	8
	96 -105	9	9	6
Gesamt		43	43	29

Tabelle 15: Vergleich der Lokalisation des geringsten Querschnittes
mit der Lokalisation der Rißstelle

Lokalisation im Bereich	Riß	geringster Querschnitt	Riß am geringsten Querschnitt
der Daumen- grundgelenke (A in Abb. 16)	4x $\hat{=}$ 9 %	6x $\hat{=}$ 14 %	2x $\hat{=}$ 33 %
der Umlenkung (B in Abb. 16)	30x $\hat{=}$ 70 %	28x $\hat{=}$ 65 %	23x $\hat{=}$ 82 %
zwischen A+B in Abb. 16	9x $\hat{=}$ 21 %	9x $\hat{=}$ 21 %	4x $\hat{=}$ 44 %
	100 %	100 %	MW = 67 %

Tabelle 16: Zusammenfassung der einzelnen Bereiche aus Tab. 15

In 70 % der Versuche erfolgte der experimentelle Riß in einem dem distalen Rand des Retinaculum extensorum entsprechenden Bereich. In 65 % der Fälle war in diesem Bereich auch der geringste Sehnenquerschnitt zu finden (vgl. Tab. 16). Im Durchschnitt erfolgte in 67 % aller Fälle der Riß an der Stelle des geringsten Querschnittes. Damit war bei den vorliegenden Experimenten eine große Übereinstimmung der Lokalisation des Sehnenrisses mit der Lokalisation des geringsten Querschnittes im Sehnenverlauf festzustellen (Abb. 16).

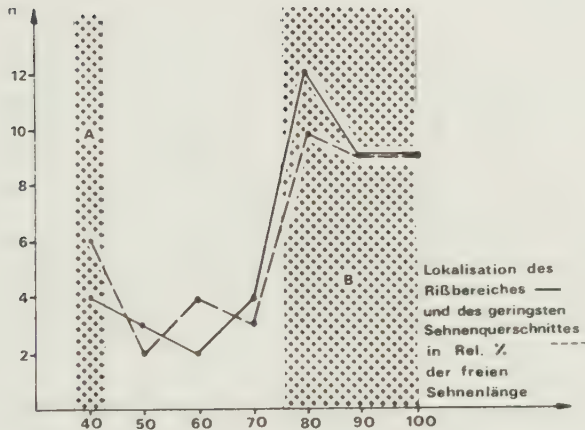


Abb. 16: Vergleich der Lokalisation des Rißbereiches mit der Lokalisation des geringsten Querschnittes im Sehnenverlauf

4.4. Vergleich der Sehnenquerschnittsflächen mit verschiedenen Parametern

Die ermittelten Werte des geringsten und mittleren Querschnittes jeder einzelnen Sehne im Vergleich mit Geschlecht, Lebensalter, Körpergröße, Körpergewicht, Handgelenks- und Mittelhandumfang, maximaler Rißkraft und Kraft/geringstem Querschnitt zeigt die folgende Tabelle (Tab. 17). Die aufgeführte Reihenfolge richtet sich nach dem geringsten Querschnitt.

Sehnennummer	geringster Querschn. (mm ²)	Rißdauer (sec.)	mittlerer Querschn. (mm ²)	Geschlecht	Alter (Jahre)	Größe (cm)	Gewicht (kg)	Handgelenkumfang (cm)	Mittelhandumfang (cm)	Maximale Rißkraft (kp)	Max. Rißkraft/ger. Q (kp/mm ²)	Anstiegswinkel der Rißkraftkurve (Grad)
30 re	8,46	0,580	9,85	m	17	178	54,5	16,0	21,5	90,0	10,64	87,5
46 li	8,37	0,425	9,52	m	47	181	78,2	17,6	20,9	90,0	10,75	87,5
46 re	8,22	0,600	9,66	m	47	181	78,2	16,5	20,6	92,0	11,19	87,5
56 li	8,08	0,640	9,21	m	16	176	70,0	18,2	22,4	89,0	11,01	86,5
32 re	7,88	0,525	9,50	m	63	182	80,6	20,2	23,8	99,0	12,56	87,5
30 li	7,77	0,545	8,31	m	17	178	54,5	16,0	21,0	75,0	9,65	87,0
32 li	7,67	0,550	9,22	m	63	182	80,6	19,0	23,5	65,5	8,54	85,5
56 re	7,28	0,535	8,12	m	16	176	70,0	18,0	21,2	78,5	10,78	86,5
36 li	6,36	0,425	8,14	w	85	155	56,9	15,8	20,8	51,5	8,10	85,5
37 li	6,25	0,500	8,72	m	66	173	61,0	18,1	21,5	45,5	7,28	85,5
43 re	6,23	0,485	6,37	m	88	166	53,0	17,5	21,0	43,0	6,90	85,0
48 re	6,19	0,450	8,09	w	63	162	62,2	15,4	18,6	63,0	10,18	87,0
34 re	6,15	0,425	8,64	m	48	159	48,8	15,4	20,2	58,0	9,43	86,0
48 li	6,05	0,495	6,95	w	63	162	62,2	15,0	18,0	65,0	10,74	86,0
35 li	5,85	0,540	7,16	m	44	176	86,2	18,4	22,4	62,0	10,60	87,0
57 re	5,61	0,605	8,44	m	22	178	47,8	16,7	18,8	67,5	12,03	86,0
38 li	5,60	0,490	6,95	m	35	165	73,0	16,5	20,5	67,5	12,05	86,5
38 re	5,40	0,560	8,27	m	35	165	73,0	16,9	21,5	60,5	11,20	86,5
37 re	5,39	0,500	7,18	m	66	173	61,0	18,2	21,5	45,5	8,44	85,5
35 re	5,22	0,515	6,40	m	44	176	86,2	18,9	22,9	62,0	11,88	85,5
54 li	5,09	0,545	5,95	m	50	167	65,0	15,7	20,6	67,0	13,16	87,0
36 re	5,06	0,520	6,79	w	85	155	56,9	16,5	20,8	48,0	9,49	86,5

Tabelle 17: Vergleich der Sehnenquerschnittsflächen mit verschiedenen Parametern.

Sehnennummer	geringster Querschn. (mm ²)	Rißdauer (sec.)	mittlerer Querschn. (mm ²)	Geschlecht	Alter (Jahre)	Größe (cm)	Gewicht (kg)	Handgelenkumfang (cm)	Mittelhandumfang (cm)	Maximale Rißkraft (kp)	Max. Rißkraft/ger. Q (kp/mm ²)	Anstiegswinkel der Rißkraftkurve (Grad)
47 li	5,05	0,475	7,29	m	51	173	48,9	13,9	18,0	70,5	13,96	86,0
34 li	5,02	0,475	7,79	m	48	159	48,8	15,3	20,7	58,0	11,55	84,5
39 li	5,02	0,560	6,53	m	75	165	66,5	17,7	20,6	56,5	11,25	85,5
31 re	4,99	0,445	5,74	w	75	159	65,0	16,5	19,0	61,5	12,32	85,0
43 li	4,87	0,485	6,37	m	88	166	53,0	15,4	19,4	36,0	7,39	84,0
44 li	4,75	0,475	5,64	w	35	159	71,8	16,9	19,7	42,0	8,84	84,5
55 li	4,48	0,550	5,65	w	21	170	50,3	15,4	17,9	60,0	13,39	85,5
47 re	4,47	0,455	6,43	m	51	173	48,9	14,7	18,3	52,0	11,63	86,0
57 li	4,44	0,650	5,10	m	22	178	47,8	15,0	17,5	69,5	15,65	86,0
55 re	4,38	0,485	6,05	w	21	170	50,3	15,6	18,9	66,0	15,07	85,0
40 re	4,34	0,410	6,02	w	38	170	55,5	15,5	18,2	29,0	6,68	81,0
2 re	4,14	0,425	4,73	w	27	171	53,0	15,5	18,5	44,5	10,75	85,0
2 li	3,95	0,540	4,74	w	27	171	53,0	15,5	18,0	52,5	13,29	85,0
41 li	3,92	0,375	5,84	m	29	166	82,6	17,5	21,2	65,5	16,71	85,5
44 re	3,86	0,460	5,26	w	35	159	71,8	17,6	19,8	35,0	9,07	84,0
41 re	3,81	0,475	5,61	m	29	166	82,6	18,5	22,5	42,5	11,15	85,5
40 li	3,80	0,445	4,99	w	38	170	55,5	15,2	17,9	32,0	8,42	84,0
42 re	3,72	0,490	5,04	w	40	154	85,0	18,8	19,5	35,0	9,41	83,5
54 re	3,71	0,435	6,66	m	50	167	65,0	15,5	19,4	56,5	15,23	85,5
31 li	3,50	0,485	4,55	w	75	159	65,0	16,5	19,0	61,5	17,57	83,0
42 li	3,43	0,465	4,84	w	40	154	85,0	19,4	20,0	26,0	7,58	81,0

Zusammenhang zwischen geringstem Querschnitt der Sehne und der Körpergröße:

Für die Sehne des M. extensor pollicis longus besteht ein statistisch nachgewiesener Zusammenhang zwischen minimalem Sehnenquerschnitt und Körpergröße (Abb. 17).

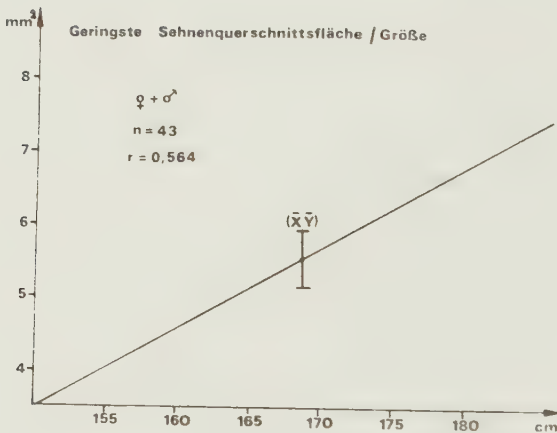


Abb. 17: Abhängigkeit der geringsten Sehnenquerschnittsfläche von der Körpergröße

Tabelle 18: Vergleich von Mittel- und Handgelenksumfängen mit dem geringsten Querschnitt der jeweils dazugehörigen Sehne des M. ext. pollicis longus.

a) Mittelhand- und Handgelenksumfang rechts > links.

Nr.	Handgelenksumfang			Mittelhandumfang			geringster Sehnenquerschnitt		
	[cm]			[cm]			[mm ²]		
	li	re	Δ	li	re	Δ	li	re	Δ
45	16,4	16,6	0,2	21,4	23,7	2,3	5,95	6,28	0,33
43	15,4	17,5	2,1	19,4	21,0	1,6	4,61	5,90	1,29
57	15,0	16,7	1,7	17,5	18,8	1,3	4,20	5,31	1,11
41	17,5	18,5	1,0	21,2	22,5	1,3	3,71	3,61	-0,10
38	16,5	16,9	0,4	20,5	21,5	1,0	5,30	5,11	-0,19
30	16,0	16,0	0,0	21,0	21,5	0,5	7,35	8,01	0,66
35	18,4	18,9	0,5	22,4	22,9	0,5	5,54	4,94	-0,60
34	15,3	15,4	0,1	20,2	20,7	0,5	4,75	5,82	1,07
47	13,9	14,7	0,8	18,0	18,3	0,3	4,78	4,23	-0,55
32	19,0	20,2	1,2	23,5	23,8	0,3	7,26	7,46	0,20
55	15,4	15,6	0,2	17,9	18,9	1,0	4,24	4,15	-0,09
48	15,0	15,4	0,4	18,0	18,6	0,6	5,73	5,86	0,13
2	15,5	15,5	0,0	18,0	18,5	0,5	3,74	3,92	0,18
40	15,2	15,5	0,3	17,9	18,2	0,3	3,60	4,11	0,51
44	16,9	17,6	0,7	19,7	19,8	0,1	4,50	3,65	-0,85
36	15,8	16,5	0,7	20,8	20,8	0,0	6,02	4,79	-1,23

b) Mittelhand- und Handgelenksumfang links > rechts

Nr.	Handgelenksumfang			Mittelhandumfang			geringster Sehnenquerschnitt		
	li	re	Δ	li	re	Δ	li	re	Δ
56	18,2	18,0	0,2	22,4	21,2	1,2	7,65	6,89	0,76
54	15,7	15,5	0,2	20,6	19,4	1,2	4,82	3,71	1,11
46	17,6	16,5	0,9	20,9	20,6	0,3	7,92	7,78	0,14
42	19,4	18,8	0,6	20,0	19,5	0,5	3,25	3,52	-0,27

c) Mittelhand- und Handgelenksumfang links = rechts

Nr.	Handgelenksumfang			Mittelhandumfang			geringster Sehnenquerschnitt		
	li	re		li	re		li	re	Δ
37	18,1	18,2		21,5	21,5		5,92	5,10	0,82
31	16,5	16,5		19,0	19,0		3,31	4,72	1,41

Zwischen dem geringsten Querschnitt und dem Handgelenksumfang bestehen statistisch keine Zusammenhänge.

Für den jeweiligen Mittelhandumfang ist ein statistischer Zusammenhang mit dem geringsten Sehnenquerschnitt des M. extensor pollicis longus nachzuweisen (Abb. 18).

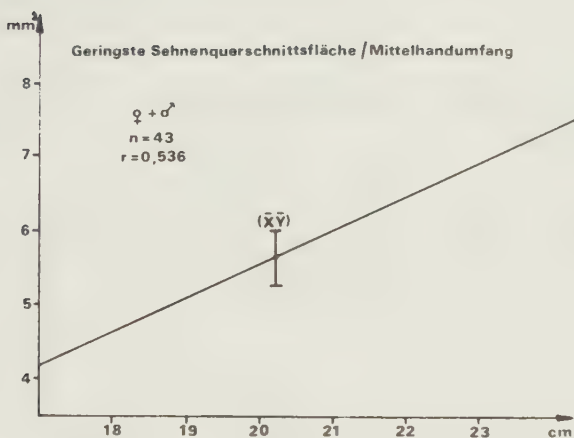


Abb. 18: Abhängigkeit der geringsten Sehnenquerschnittsfläche vom Mittelhandumfang

5. Vergleich der maximalen Belastbarkeit der Sehne mit verschiedenen Parametern

Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit vom Alter

Bei der Auswertung von 43 Sehnenrissen ohne Berücksichtigung des Geschlechtes wurde im Durchschnitt eine maximale Belastbarkeit von $59,1 \pm 17,7$ kp ermittelt. Eine Abhängigkeit vom Alter ließ sich nur bei Sehnen männlicher Individuen feststellen (Abb. 19).

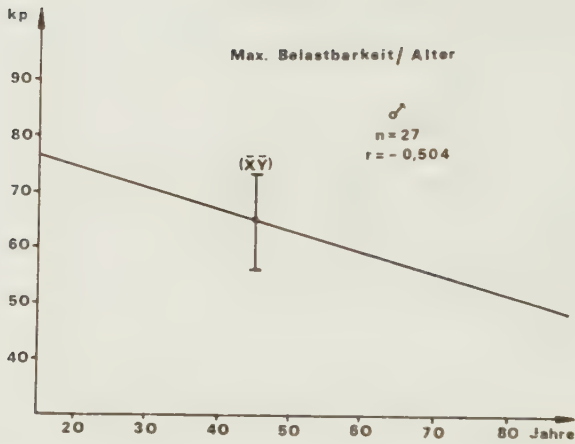


Abb. 19: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit vom Lebensalter

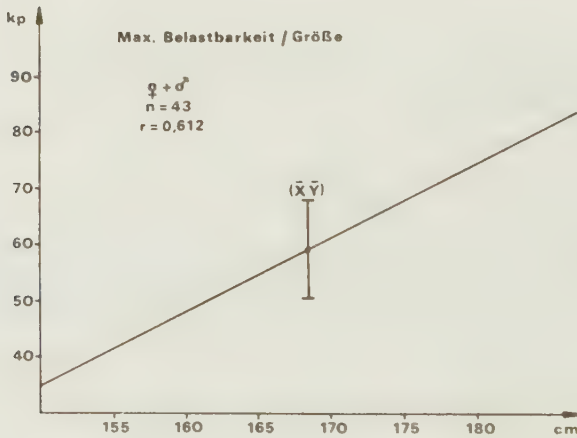


Abb. 20: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit von der Körpergröße

Ein statisch nachgewiesener Zusammenhang besteht auch zwischen der Körpergröße und der maximalen Belastbarkeit der langen Daumenstrecksehne (Abb. 20).

Belastbarkeit in Abhängigkeit vom geringsten Querschnitt

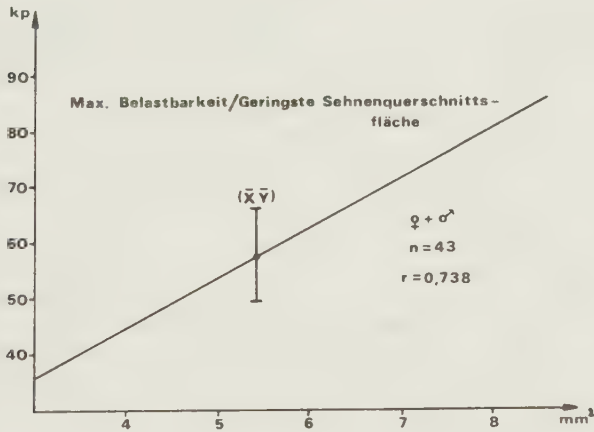


Abb. 21: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit von der geringsten Sehnenquerschnittsfläche ohne Berücksichtigung des Geschlechts

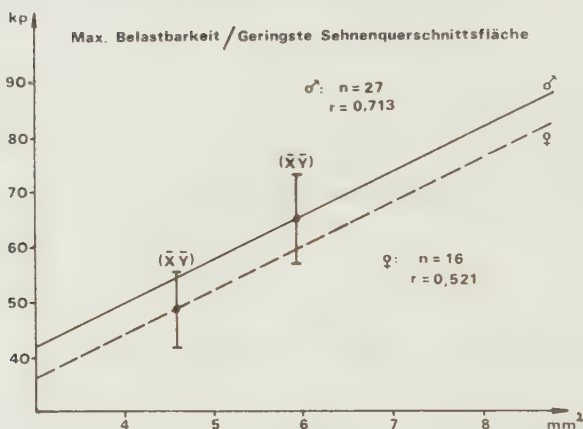


Abb. 22: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit von der geringsten Sehnenquerschnittsfläche bei Männern (durchgezogene Linie) und bei Frauen (gestrichelte Linie)

Bei der Auswertung von 43 Sehnenrissen wurde ein Mittelwert der Maximalbelastbarkeit pro geringstem Querschnitt von $10,91 \pm 2,55$ kp/mm² errechnet. Die Sehnen männlicher Individuen waren mit $11,05 \pm 2,32$ kp/mm² gering höher belastbar als die Sehnen weiblicher Personen ($10,68 \pm 2,95$ kp/mm²) (Abb. 21, 22 und Tab. 19).

Tab. 19: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit der langen Daumenstrecksehne vom geringsten Sehnenquerschnitt bei Männern und Frauen

M ä n n e r			F r a u e n		
Maximale Rißkraft	Geringster Querschnitt	Max.Rißkraft pro geringstem Querschnitt	Maximale Rißkraft	Geringster Querschnitt	Max.Rißkraft pro geringstem Querschnitt
kp	mm ²	kp/mm ²	kp	mm ²	kp/mm ²
70,5	5,05	13,96	61,5	4,99	12,32
58,0	5,02	11,55	42,0	4,75	8,84
56,5	5,02	11,25	60,0	4,48	13,39
36,0	4,87	7,39	66,0	4,38	15,07
52,0	4,47	11,63	29,0	4,34	6,68
69,5	4,44	15,65	44,5	4,14	10,75
65,5	3,92	16,71	52,5	3,95	13,29
42,5	3,81	11,15	35,0	3,86	9,07
56,5	3,71	15,23	32,0	3,80	8,42
90,0	8,46	10,64	35,0	3,72	9,41
90,0	8,37	10,75	61,5	3,50	17,57
92,0	8,22	11,19	26,0	3,43	7,58
89,0	8,08	11,01	51,5	6,36	8,10
99,0	7,88	12,56	63,0	6,19	10,18
75,0	7,77	9,65	65,0	6,05	10,74
65,5	7,67	8,54	48,0	5,06	9,49
78,5	7,28	10,78			
45,5	6,25	7,28			
43,0	6,23	6,90			
58,0	6,15	9,43			
62,0	5,85	10,60			
67,5	5,61	12,03			
67,5	5,60	12,05			
60,5	5,40	11,20			
45,5	5,39	8,44			
62,0	5,22	11,88			
67,0	5,09	13,16			
MW 65,35	MW 5,96	MW 11,05	MW 48,28	MW 4,56	MW 10,68
± 16,5	± 1,49	± 2,32	± 13,8	± 0,95	± 2,95

Belastbarkeit in Abhängigkeit vom Querschnitt bei Sehnenpaaren

Wie folgende Abbildung (Abb. 23) zeigt, bestehen deutliche Zusammenhänge zwischen Reißkraft und Querschnitt von Sehnenpaaren eines Individuums.

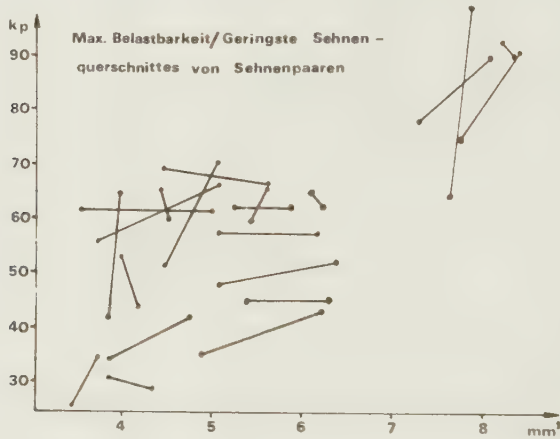


Abb. 23: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit von der geringsten Sehnenquerschnittsfläche bei Sehnenpaaren

Abhängigkeit der Reißkraft vom Alter des Individuums

	Männer + Frauen		Männer		Frauen	
Alter	n	KR/MinQ	n	KR/MinQ	n	KR/MinQ
15-24	8	12,28 kp/mm ²	6	11,63 kp/mm ²	2	14,23 kp/mm ²
25-34	4	12,98 "	2	13,93 "	2	12,02 "
35-44	10	9,57 "	4	11,43 "	6	8,33 "
45-54	8	11,72 "	8	11,72 "	-	- "
55-64	4	10,51 "	2	10,55 "	2	10,46 "
65-74	2	7,86 "	2	7,86 "	-	- "
75-84	3	13,71 "	1	11,25 "	2	14,95 "
> 85	4	7,97 "	2	7,15 "	2	8,80 "
Σ	43	10,91 kp/mm ²	27	11,05 kp/mm ²	16	10,68 kp/mm ²

Tabelle 20: Reißfestigkeitsmittelwerte von langen Daumenstrecksehne bei einzelnen Altersgruppen

Dabei war nur bei den männlichen Individuen ein nachweisbarer statistischer Zusammenhang zwischen der Belastbarkeit der Sehne pro minimaler Querschnittsfläche und dem Lebensalter festzustellen.

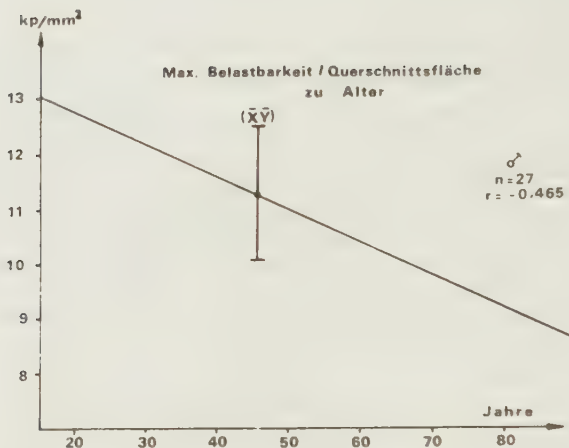


Abb. 24: Abhängigkeit der maximalen Belastbarkeit pro geringster Sehnenquerschnittsfläche vom Lebensalter bei Männern

Mit zunehmendem Alter nimmt also die Belastbarkeit der Sehne pro geringstem Querschnitt ab.

Die auf Seite 10 beschriebene Sehne des 75-jährigen Mannes riß bei der Belastung von 70,5 kp.

Die Belastbarkeit lag damit nur um etwas mehr als 10 kp über dem Durchschnitt.

Eine weit höhere Belastung wäre auf Grund des großen Querschnittes (Minimum: 13,03 mm²; Maximum: 18,25 mm²; normaler Sehnenquerschnitt ca. 7 mm²) zu erwarten gewesen, aber wohl wegen des hohen Lebensalters nicht festzustellen. Für diese Sehne ergab sich eine Belastbarkeit pro geringstem Querschnitt von 5,41 kp/mm².

Zum Vergleich die Werte der anderen Sehne desselben Individuums

Rißkraft	56,6 kp
geringster Querschnitt	5,02 mm
Kraft/geringstem Querschnitt	11,25 kp/mm

V. DISKUSSION

Bei traumatischem Rupturgeschehen ist die Reißstelle in hohem Maße von der Lokalisation der einwirkenden Kraft abhängig und daher nicht für einen Vergleich mit der experimentellen Untersuchung zu verwenden. Übereinstimmend mit der Klinik der Spontanrupturen findet sich im Experiment die Rupturstelle in der großen Mehrzahl der Fälle in einem Bereich, der in vivo demjenigen knapp distal des dritten Sehnenfaches entspricht. Erklärlich wird diese Situation dadurch, daß in diesem Bereich neben der starken Ablenkung im Sehnenverlauf auch in 65 % der Fälle der geringste Sehnenquerschnitt gefunden wird. Besondere Bedeutung erlangt die Tatsache, daß die Ruptur in 25 % der experimentellen Risse in dem Bereich knapp distal des Retinaculum extensorum erfolgte, obwohl die Stelle des geringsten Querschnittes nicht in diesem Bereich lokalisiert war.

Die Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf die Reißlokalisation an der dünnsten bzw. nicht an der dünnsten Stelle ergab lediglich ein höheres Durchschnittsalter von Individuen, deren Sehnen nicht im Bereich des geringsten Querschnittes gerissen waren. Andere zum Vergleich herangezogene Parameter wiesen keine wesentlichen Unterschiede auf. Das deutlich höhere durchschnittliche Lebensalter bei nicht am geringsten Querschnitt erfolgten Reiß läßt den Schluß zu, daß die Sehne mit zunehmendem Alter Veränderungen unterworfen ist, die auch das Reißverhalten beeinflussen. Ob diese Änderung mit degenerativen Ab- oder Umbauvorgängen im Alter zusammenhängt, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Verschiedene Autoren befassten sich jedoch bereits mit diesem Problem (3,21,24,26,27,59,63,69). Vorwiegend wurden Störungen in der Durchblutung der Sehne für die Degeneration verantwortlich gemacht.

Weitere Hinweise auf die Altersabhängigkeit des Reißverhaltens liefern die Untersuchungen über die maximale Belastbarkeit der Sehnen. Dabei ist vor allem bei Männern mit zunehmendem Alter

eine deutliche Abnahme der Reißkraft auffallend. Bei Frauen ist zwar eine Tendenz in der gleichen Richtung zu erkennen, eine statistisch nachgewiesene Abhängigkeit besteht wohl auf Grund der geringen Versuchszahl nicht.

Vergleicht man bei beiden Geschlechtern die maximale Belastbarkeit bezogen auf den geringsten Querschnitt der Sehne, so zeigt sich wiederum nur bei den Männern eine statistisch nachgewiesene Altersabhängigkeit. Die Sehnenfaserbündel sind im Alter weniger belastbar (vgl. S. 69).

Bei verschiedenen Auswertungen von Spontanrupturen der langen Daumenstrecksehne zeigte sich eine deutliche Bevorzugung des weiblichen Geschlechts gegenüber dem männlichen Geschlecht (vgl. Tab. 21).

Verfasser	Anzahl der Fälle	♀	♂
Trevor	9	9 ≙ 100 %	0 ≙ 0 %
Strandell	209	140 ≙ 67 %	69 ≙ 33 %
Heybroek		60 %	40 %
Wilhelm	31	19 ≙ 61 %	12 ≙ 39 %

Tabelle 21: Geschlechtsverteilung bei Spontanrupturen der langen Daumenstrecksehne

Dabei war die Häufigkeit vorangegangener Handgelenkstraumen bei beiden Geschlechtern ausgeglichen (63). Der Grund für die häufige Spontanruptur bei Frauen muß also in der Beschaffenheit der Sehne selbst liegen.

Von der Anatomie her sind zwar keine Unterschiede zu erwarten, aber es sind Hinweise für solche Unterschiede vorhanden. Wie wäre es sonst zu verstehen, daß die Daumenstrecksehnen männli-

cher Individuen auf den geringsten Sehnenquerschnitt bezogen größeren Belastungen standhalten als die Sehnen weiblicher Individuen. Das unterschiedliche Reißverhalten wäre durch eine bei Männern vermehrte handwerkliche Tätigkeit erklärbar, was eine gewisse Trainierbarkeit von Sehnen bedeuten würde. Dies ist jedoch noch Gegenstand laufender Experimente. STRANDELL (64) führte die höhere Beteiligung der Frauen an Spontanrupturen auf die größere Empfindlichkeit des Blutgefäßsystems der Sehne gegenüber Traumen zurück.

Die Ergebnisse vorliegender Arbeit zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Reißkraft von dem geringsten Querschnitt einer Sehne. Die geringste Querschnittsfläche einer Sehne korreliert wiederum sehr stark mit der Körpergröße und dem Mittelhandumfang. Nachdem Frauen im Durchschnitt eine geringere Körpergröße und einen geringeren Mittelhandumfang besitzen als Männer, ist es verständlich, daß bei weiblichen Individuen die geringste Sehnenquerschnittsfläche kleiner sein muß als die der männlichen Individuen. Ein geringer Sehnenquerschnitt erleichtert wiederum den Reiß der Sehne. In der folgenden Tabelle (Tab. 22) sind die in dieser Arbeit ermittelten Durchschnittswerte gegenübergestellt.

Tabelle 22:

	Männer n = 27	Frauen n = 16
Körpergröße [cm]	172 $\pm$ 7	162 $\pm$ 7
Mittelhandumfang [cm]	20,9 $\pm$ 1,6	19,0 $\pm$ 1,0
geringste Sehnenquerschnittsfläche [mm ²]	5,96 $\pm$ 1,49	4,56 $\pm$ 0,95
Maximale Belastbarkeit	65,4 $\pm$ 16,5	48,3 $\pm$ 13,8

Tabelle 22: Mittelwert verschiedener Parameter getrennt nach
Männer und Frauen

Für die Bevorzugung des weiblichen Geschlechts bei Spontanrupturen der langen Daumenstrecksehne ist die kleinere Sehnenquerschnittsfläche und damit eine geringere Belastbarkeit sicher mitverantwortlich. Ein nicht auf Anhieb zu verstehender, statistisch nachgewiesener Zusammenhang besteht zwischen der maximalen Belastbarkeit der langen Daumenstrecksehne und der Körpergröße. Betrachtet man aber den hohen Korrelationskoeffizienten zwischen der Körpergröße und der geringsten Sehnenquerschnittsfläche, so wird es einsichtig, daß mit zunehmender Körpergröße der Sehnenquerschnitt und damit die maximale Belastbarkeit steigt.

Die in der Literatur bisher angegebenen Reißfestigkeiten bei experimentellen Sehnenrissen liegen meist niedriger, als die bei unseren Versuchen ermittelten. Die Ursache hierfür liegt in hohem Maße an der bei unseren Versuchen angewendeten Vorspannung der Sehne vor dem Reiß und der dann plötzlich einwirkenden Kraft. Dieser Vorgang entspricht weitgehend den physiologischen Verhältnissen. WILHELM (72) fand eine höhere Belastbarkeit von Sehnen bei einer solchen dynamischen Beanspruchung.

Mit zunehmendem Alter nimmt sowohl die maximale Belastbarkeit der langen Daumenstrecksehne als auch die Belastbarkeit bezogen auf den geringsten Sehnenquerschnitt ab. Ob im Laufe des Lebens eine Vorschädigung der zur Untersuchung gelangten Sehnen eintrat, war zwar nie ganz auszuschließen, aber auf Grund der jeweils vorgelegenen anatomischen Verhältnisse unwahrscheinlich.

Die im Alter sinkende Belastbarkeit hängt mit einer zunehmenden Minderwertigkeit des Sehnengewebes zusammen. RAU (57) wies nach, daß die Durchblutung der Achillessehne jenseits des 25. Lebensjahres sehr rasch abnimmt. Es ist nun nicht anzunehmen, daß dieser den Stoffwechsel vermindernde Vorgang nur in der Achillessehne vor sich geht. Diese Gefäßverödung wird durch eine Atherosklerose eingeleitet und verläuft mit einer fettigen Degeneration im Sehnengewebe parallel.

Wenn nun dieser physiologische Alterungsprozeß die Stoffwechselvorgänge im Sehnengewebe in so hohem Maße verschlechtert, so ist es doch verständlich, daß zusätzliche Unfallereignisse die Widerstandskraft der Sehne stark herabsetzen. Über die verschiedenen Theorien wie es vom Trauma zur Spontanruptur kommt herrscht aber Uneinigkeit. Für die Radiusfraktur, die häufigste Ursache der spontanen Ruptur der Sehne des M. extensor pollicis longus konnte FREILINGER und ZACHERL (25) in allen untersuchten Fällen jeweils ein Sehnenscheidenhämatom und einen Mesotenonriß nachweisen. Die Befunde wurden bei 6 Patienten mit frischer Radiusfraktur durch Freilegung der Sehnenloge erhoben. Die lange Daumenstrecksehne selbst blieb jeweils unverletzt. Die bei den Leichenversuchen KLEINSCHMIDTS (36) erfolgten Einrisse im 3. Sehnenfach nach künstlich erzeugten Radiusfrakturen waren in keinem der 6 Fälle zu beobachten.

Wie aus den Tierexperimenten von PEACOCK (53) ersichtlich, in denen das Sehnengewebe durch Unterbrechung der Blutzufuhr über das Mesotenon und die Vinculae nekrotisierte, dürfte daher die vaskuläre Beteiligung bei einer Spontanruptur die entscheidende Rolle spielen. WEIGELDT (70) sah bereits 1914 die Schädigung

des externen Gefäßnetzes der langen Daumenstrecksehne als alleinige Ursache für die Spontanruptur an. Eine mögliche Erklärung für Spontanrupturen bei unter 25 Jahre alten Individuen fand LIPSCHÜTZ (47) auch im Gefäßsystem der Sehne. Er stellte bei etwas über 5 % der untersuchten Sehnen ein kleineres Lumen und weniger Verzweigungen der Blutgefäße als gewöhnlich fest.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Rupturstelle der Sehne des M. extensor pollicis longus bei den durchgeführten Experimenten in hohem Maß mit der in der Klinik beobachteten Rupturlokalisation übereinstimmt. Dem Sehnenriß in der Klinik liegen sicher unterschiedliche Ursachen zugrunde. Die in dieser Arbeit durchgeführte Prüfung der rein mechanischen Eigenschaften der Sehne erhärtet die Vermutung, daß sich knapp distal des Retinaculum extensorum ein Schwachpunkt der langen Daumenstrecksehne befindet, der auch bei gesunden Sehnen nachzuweisen ist.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

An 43 frisch entnommenen unbeschädigten langen Daumenstrecksehnen menschlicher Individuen wurde das Reißverhalten experimentell überprüft.

Methode:

In einem eigens konstruierten Halteapparat wurde die eingespannte Sehne einer dynamischen Belastung unterzogen und die dabei erzielten physiologischen Parameter elektronisch registriert. Außerdem kam ein neues Verfahren zur exakten Bestimmung des individuellen Querschnittsverlauf jeder Daumenstrecksehne zur Anwendung. Die Querschnittsflächen wurden in 2 mm Abständen photogrammetrisch vermessen und computermäßig erfaßt. Sämtliche erhaltenen Parameter wurden statistisch ausgewertet.

Ergebnisse:

Im Durchschnitt hielten die Sehnen einer dynamischen Belastung von 59,1 kp stand. Bezogen auf die Stelle des minimalsten Querschnitts betrug die Belastbarkeit durchschnittlich 10,91 kp/qmm, wobei sich Streuungen von 6,68 - 17,57 kp/qmm ergaben. In fast 70 % der Fälle lag die Reißstelle im Bereich des geringsten Querschnitts. Diese Stelle des geringsten Querschnitts war in der Mehrzahl der Fälle in der nächsten Umgebung des Sehnendurchtritts unter dem Retinaculum extensorum zu finden. Die Personen, deren Sehnen nicht an der Stelle des minimalen Querschnitts gerissen waren, wiesen ein wesentlich höheres Durchschnittsalter auf und die Sehnen waren weniger belastbar. Statistisch ließen sich lineare Zusammenhänge zwischen folgenden Parametern nachweisen:

1. Minimaler Querschnitt und Körpergröße
2. Minimaler Querschnitt und Mittelhandumfang

3. Minimaler Querschnitt und maximaler Belastbarkeit
4. Maximaler Belastbarkeit und Körpergröße
5. Maximaler Belastbarkeit bezogen auf den geringsten Sehnenquerschnitt und Lebensalter
6. Maximaler Belastbarkeit und Alter

Damit konnte experimentell gesichert nachgewiesen werden, daß die Ruptur der langen Daumenstrecksehne abhängt von der individuellen Lokalisation einer Schwachstelle im Sehnenverlauf, die in einem hohen Prozentsatz knapp distal des Retinaculum extensorum zu finden ist, an einer Stelle also, an der auch klinisch derartige Rupturen in hohem Maße auftreten.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

1. ALBERTINI, A.: Spezielle Pathologie der Sehnen, Sehnen-scheiden und Schleimbeutel.
Handb. der spez. Path. Anat. und Hist.
Bd. IX/1, Springer Berlin 1929 (1921) 508
2. ARNOLD, G.: Festigkeit und Kraft-Längenänderungs-Ver-
halten der Strecksehnen des menschlichen
Fußes.
Res. exp. Med. 164 (1974) 123
3. v. AUSTONI, A.: Vollkommener Riß der Quadricepssehne ober-
halb der Kniescheibe. Klin. Bild mit per-
sönlichen Beobachtungen und Untersuchungen
über das Krankheitsgeschehen.
Z. org. Chir. 78 (1940) 158
4. AXHAUSEN, G.: Die Spätruptur der Sehne des extensor polli-
cis longus bei der typischen Radiusfraktur.
Beiträge zur klin. Chirurgie 133 (1925) 78
5. BENEDICT, J.V., Stress-strain characteristics and tensile
L.B. WALKER, strength of unembalmed human Tendons.
E.H. HARRIS: J. Biomech. 1 (1968) 53
6. BLANTON, P.L., Ultimate tensile strength of fetal and adult
N.L. BIGGS: human tendons.
J. Biomech. 3 (1970) 181
7. BÖHLER, J.: Spätruptur des extensors pollicis longus
nach 40 Jahren.
Mschr. Unfallheilk. Berlin 64 (1961) 68
8. BOFINGER, B.: Zum Problem der Entstehung der subcutanen
Achillessehnenrupturen.
Mschr. Unfallheilk. 59 (1956) 50
9. BORSAY, J.C., Experimentelle Untersuchungen über den
J. CSIPAK, Pathomechanismus der spontanen Sehnenrup-
G. DEBRE: turen.
Zschr. Orthop. Stuttgart 81 (1952) 552
10. BROCKIS, J.G.: Blood supply of the flexor and extensor
tendons of the fingers in man.
J. Bone Jt. Surg. 35B (1953) 131
11. BRÜCHLE, H., Eine Meßanordnung zur Prüfung des mechani-
W. MOLL: schen Verhaltens von Sehnen.
Z. ges. exp. Med. 147 (1968) 23

12. BRUGISSER, R.: Subkutane Muskel-, Sehnenrisse.
Dissertation Zürich (1956)
13. BÜTTNER, A.: Klinik und Begutachtung der Quadriceps-
sehnenrisse.
Brun's Beitr. 179 (1949) 247
14. CHALETZKAJA, E.: Über die Lipoidablagerung und die Anhäufung
von Eiweißmassen in Sehnen.
Virch. Arch. 292 (1934) 84
15. COENEN, H.: Über die Ursache der Sehnenruptur des
extensors pollicis longus bei der typi-
schen Radiusfraktur.
Arch. orthop. chir. 28 (1930) 193
16. DAVIDSON, L.: Über die subkutane Sehnenruptur und die
Regeneration der Sehne. Eine exp. klin.
und path.-anat. Untersuchung.
Ann. chir. gynaec. Fenn 45, Suppl. 6
(1956) 1
17. DEBRUNNER, H.: Über geschlossene Muskelverletzungen
insbesondere die Muskel-Sehnenrupturen.
Z. f. Unfallmed. 43 (1950) 286
18. DÜMS, F.: Trommlerlähmung
Deutsche Militärärztliche Zeitschrift
25 (1896) 145
19. DUPLAY, M.: Rupture souscutanée du tendon du long
extenseur du pouce de la main droite au
niveau de la tabatière anatomique.
Bulletins et Memoires de la Société de
Chirurgie de Paris 2 (1876) 788
20. ELLIOTT, D.H.: Structure and function of mammalian
tendon.
Biol. Rev. 40 (1965) 392
21. FERRARI, G. de,
G. TESSAROLO: Considerazioni su sette casi di Rottura
Traumatica del Tendine prossimale del
Musculo Bicipite Brachiale.
Rivista degli Infortuni e delle Malattie
professionali 41 (1954) 95
22. FINK, R.: Zur Pathogenese der Muskel- und Sehnen-
rupturen.
Z. f. Unfallmed. 44 (1951) 41

23. FISCHER, A.E.,
G. MOLINEUS: Das ärztliche Gutachten im Versicherungswesen.
J. A. Barth Leipzig 1. Bd. (1939)
24. FRANCESCO, F.: Über die sog. spontane Sehnenruptur.
Z. org. Chir. 65 (1934) 199
25. FREILINGER, G.,
H. ZACHERL: Zur Ruptur der langen Daumenstreck-
sehne nach Radiusfraktur.
Handchirurgie 2 (1970) 76
26. GAY, B.: Injuries of the extensor tendon of the
thumb.
Zbl. Chir. 94 (1969) 273
27. GLATTHAAR, E.: Zur Pathologie der Periarthritis
humeroscapularis.
Dtsch. Z. Chir. 252 (1938) 414 und 258
28. GLOGOWSKI, G.,
D. PRESTELE: Experimental tendon rupture demonstrated
on the tendons of the caput longus of
the biceps brachii muscle.
Z. Orthop. 107 (1970) 711
29. GÜNTHER, S.: Sehnenrupturen - Klinik und Besonder-
heiten.
Unfallmed. Tagungen der Landesverbände
der gewerblichen Berufsgenossenschaften
9 (1970) 97
Hrsg.: Landesverband der gewerblichen
Berufsgenossenschaften.
30. HABIJANEC, S.: Indiciplastik. Dissertation an der
Chirurgischen Universitätsklinik München
1977
31. HEYBROCK, G.: Restoration of the extensor function of
the thumb by tendon Transposition.
Arch. Chir. Neerl. Vol. XX (1968) 55
32. HIPPE, E.: Rupturen der Muskeln und Sehnen.
Med. Klin. 58 (1963) 1202
33. JENNY, F.: Unfallmedizinische Bemerkung zum subku-
tanen Achillessehnenriß, verursacht durch
Muskelzug.
Praxis 37 (1948) 141
34. KAPEL, O.: Über die gleichzeitige doppelseitige
Ruptur des Ligamentum patellae und über
Entstehen indirekter Rupturen des Knie-
streckapparates im Allgemeinen.
Dtsch. Z. Chir. 233 (1931) 756

35. KAWAMURA, R.: Neue Beiträge zur Morphologie und Physiologie der Cholesterinsteatose. Jena Gustav Fischer (1927)
36. KLEINSCHMIDT, K.: Versuche zur Erklärung der Spättraktur der langen Daumenstrecksehne nach Radiusfraktur. Beiträge zur klin. Chir. 146 (1929) 530
37. KÖNIG, F.;
MAGNUS, G.: Handbuch der gesamten Unfallheilkunde. Bd. 3 Stuttgart: Enke 1932
38. KÖNN, G.: Morphologie der spontanen Sehnenzerreißen und ihre gutachtliche Beurteilung. Unfallmed. Tagungen der Landesverbände der gewerblichen Berufsgenossenschaften 9 (1970)
Hrsg.: Landesverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
39. KÖNN, G.;
H.J. EVERTH: Morphologie der spontanen Sehnenzerreißen. H. Unfallheilkunde 91 (1967) 255
40. KOLEN, H.: Über die Ablagerung von Lipoiden im Auge und ihre Beziehung zum Alter, sowie zu der Lipoidablagerung in den Bindestanzen anderer Körperteilen. Virch. Arch. 263 (1927) 46
41. KREYSZIG, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 3. Aufl. Göttingen: Van den Hoeck und Rupprecht 1968
42. LANG, H.B.: Untersuchungen über die Aufbrauchveränderungen an der Quadrizepssehne. Zschr. Orthop. 91 (1964) 171
43. LANG, J.: Über die Blutgefäße der Sehnenscheide. Acta anat. 51 (1963) 273
44. LANG, J.;
K. VIERNSTEIN: Degeneration, Riß und Regeneration der Achillessehne. Zschr. Orthop. 101 (1966) 160
45. LANGE, M.: Muskel und Sehnenschäden beim Sport. Wien klin. Wschr. 54 (1941) 485
46. LAZZARONI, A.: Sulla degenerazione grassa dei tendini. Pathologica 26 (1934) 735
47. LIPSCHÜTZ, B.: Late subcutaneous rupture of tendon of extensor pollicis longus muscle. Arch. Surg. 31 (1935) 816

48. MAYDL, K.: Über subcutane Muskel-Sehnenzerreißen, sowie Rißfrakturen mit Berücksichtigung der analogen, durch direkte Gewalt entstandenen und offenen Verletzungen. Deutsche Z. f. Chir. 17 (1882) 306
49. MOISSEJEFF, A.: Über Alterserscheinungen in den Sehnen. Münchner Med. Wochenschr. 23 (1921) 1535
50. MENSCH, N.: Spättraktur der Sehne des Extensor pollicis longus. Münchner Med. Wochenschr. 72 (1925) 836
51. MÖSENER, H.;
D. FINK;
H. GRABHERR: Der subcutane Riß der langen Daumenstrecksehne. Arch. orthop. Unfall Chir. 81 (1975) 267
52. NIGST, H. et al.: Spontaneous rupture of Extensor pollicis longus. Reconstr. Surg. Traumatol. 12 (1971) 272
53. PEACOCK, E.: A study of the circulation in normal tendons and healing grafts. Ann. surg. 149 (1959) 415
54. PERRET, F.: Begutachtung von Sehnenschäden in der privaten Unfallversicherung. Unfallmed. Tagungen der Landesverbände der gewerblichen Berufsgenossenschaften. 9 (1970)
Hrsg.: Landesverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
55. PHILIPOWICZ, J.: Zur Kasuistik und Ätiologie der Ruptur des Ligamentum patellae. Zbl. Chir. 50 (1923) 833
56. PLATZGUMMER, H.: Die spontane Quadrizepssehnenruptur. Zeitschrift f. Orthopädie und ihre Grenzgebiete 80 (1951) 195
57. RAU, E.: Die Gefäßversorgung der Sehnen. Anat. Hefte 50 (1914) 677
58. RITTER, A.: Die Behandlung und Prognose der Karpalverletzungen und ihre Folgezustände unter Berücksichtigung unfallmed. Gesichtspunkte. Schweizer Med. Wochenschr. 60 (1930) 1232

59. ROLLHÄUSER, H.: Die Festigkeit menschlicher Sehnen nach Quellung und Trocknung in Abhängigkeit vom Lebensalter.
Morph. Jb. 90 (1952) 180
60. ROLLHÄUSER, H.: Konstitutions- und Altersunterschiede in der Festigkeit kollagener Fibrillen.
Morph. Jb. 90 (1950) 157
61. SACHS, L.: Statistische Methoden 2. Aufl.
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1972
62. SCHNEIDER, H.;
V. CORRADINI: Aufbrauchveränderungen in sehr beanspruchten Sehnen der oberen Extremität und ihre klin. Bedeutung.
Z. Orthop. 84 (II) (1954) 278; (III) (1954) 333
63. v.STAPELMOHR, S.: Über "hohe Spät rupturen" der Sehne des Extensor pollicis longus.
Acta chir. Scand. 86 (1942) 110
64. STRANDELL, G.: Subcutaneous rupture of extensor pollicis longus tendon - pathogenesis and treatment, survey based on 208 cases.
Acta chir. scandinav. 109 (1955) 81
65. STUCKE, K.: Über das elastische Verhalten der Achillessehne im Belastungsversuch.
Arch. klin. Chir. 265 (1950) 579
66. THIESBÜRGER, B.: Die gleichzeitig entstandenen subkutane ZerreiBung beider unterer Kniescheibenbänder.
Beitr. klin. Chir. 157 (1933) 286
67. TREVOR, D.: Rupture of the extensor pollicis longus after colles fracture.
J. of Bone Surg. 32 (1950) 370
68. TRIEPEL, H.: Einführung in die physikalische Anatomie.
Bd. I Wiesbaden, Bergmann 1902
69. WACHS, E.;
F. MEISSNER: Zur Frage der Genese von spontan entstandenen Sehnenrupturen.
Beitr. klin. Chir. 183 (1951) 348
70. WEIGELDT, W.: Über die Spontanrupturen der Fingersehnen.
Beitr. klin. Chir. 94 (1914) 310
71. WILHELM, A.: Tendon injuries of the hand.
Dtsch. Med. J 21 (1970) 1391

72. WILHELM, K.: Eine neue Versuchsanordnung zur Belastbarkeitsprüfung von Achillessehnen. Res. exp. Med. 160 (1977) 80
73. WILHELM, K.: Die subcutane traumatische Achillessehnenruptur. Münchn. Med. Wschr. 7 (1969) 386
74. WILHELM, K.: Neue Aspekte zur Genese der Achillessehnenruptur. Zbl. Chir. 102 (1977) 794
75. WITT, A.N.: Klinik und operative Behandlung der Sehnenzerreißen. H. Unfallheilk. 91 (1965) 262
76. WITT, A.N.: Sehnenverletzungen. Allg. Orthop. Thieme Stuttgart (1957) 722
77. WÖHLISCH, E., et al.: Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften tierischer Gewebe. Z. Biol. Bd. 85 (1927) 325
78. ZEUMER, G.: Über Spontanrupturen an Muskeln und Sehnen. Dt. Gesundheitswesen 15 (1960) 53
79. ZUR VERTH, M.: Über spontane Zerreißen der Sehne des langen Daumenstreckers. Dtsch. Z. Chir. 102 (1900) 569

Für die Überlassung des Themas und die jederzeit bereitwillige Unterstützung in allen Fragen möchte ich Herrn Prof. Dr. Wilhelm meinen ganz besonderen Dank sagen.

Herrn Prof. Dr. Spann schulde ich für die Möglichkeit der Gewinnung des Untersuchungsgutes meinen Dank.

Für die Gelegenheit die Sehnenrißversuche im Materialprüfamt für Maschinenbau der TU München durchzuführen danke ich Herrn Prof. Heckel. Seinen Mitarbeitern Herrn Gassenhuber und Herrn Hofmeister bin ich für die Anfertigung der verschiedenen Haltevorrichtungen sehr zu Dank verpflichtet.

Herr Dr. Stephani und Herr Dr. Obermeier vom Institut für Photogrammetrie der TU München waren mit bei den schwierigen Problemen der Sehnenquerschnittsbestimmung in sehr dankenswerter Weise jederzeit behilflich.

Bei Herrn Sund vom Institut für medizinische Datenverarbeitung darf ich mich für die gute Beratung bei der statistischen Auswertung bedanken.

Für die Herstellung der zahlreichen Abbildungen danke ich Frau Schlötterer herzlich.

Besonderen Dank sage ich Frl. Lucia Schindler für die viele Mühe beim Schreiben der Arbeit.

LEBENSALUF

Am 28.5.1947 wurde ich als zweites von drei Kindern des Dipl. Ing. Wilhelm Proksch und seiner Ehefrau Hedwig Proksch geb. Iwan in München geboren.

Nach dem Besuch der Volksschule 2 Jahre in Bad Krozingen und 2 Jahre in München, trat ich 1957 in das mathematisch-naturwissenschaftliche Rupprecht-Gymnasium in München ein, an dem ich 1966 die Reifeprüfung ablegte.

Nach Ableistung von zwei Jahren bei der Bundeswehr und zwei Wartesemestern, erhielt ich 1969 die Zulassung zum Studium der Humanmedizin in München.

Anschließend an das Staatsexamen im Herbst 1976 war ich als Medizinalassistent am Kreiskrankenhaus Schongau, an der chirurgischen Privatklinik Prof. Dr. Hart und der I. Universitätsfrauenklinik in München tätig.

Seit Januar 1978 arbeite ich als Assistenzarzt auf der Inneren Abteilung des Kreiskrankenhauses in Schongau.

